

# **MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES**



## **DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO SOLAR APLICADO A UN SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA SOLAR/CONVENCIONAL EN EL COLEGIO GONZALO JIMÉNEZ NAVAS DE FLORIDABLANCA - SANTANDER**

**AUTOR**

**JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA**

**MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
JUNIO 2017**

**MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES**



**DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO SOLAR APLICADO  
A UN SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA SOLAR/CONVENCIONAL EN EL  
COLEGIO GONZALO JIMÉNEZ NAVAS DE FLORIDABLANCA - SANTANDER**

**AUTOR**

**JACKSON ALIRIO PÉREZ PARADA**

**Director**

**CARLOS ARTURO VIDES HERRERA**

**Co- Director**

**IVALDO TORRES CHÁVEZ**

**MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
JUNIO 2017**

# Agradecimientos

*A Dios por ser mi guía.*

*A todos los que de forma directa e indirecta contribuyeron a alcanzar esta meta.*

# Tabla de Contenido

Capítulo I .....	10
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.4 CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO .....	15
1.5 ALCANCES ESPERADOS .....	17
1.6 PERTINENCIA RESPECTO A LA REGIÓN .....	18
Capítulo II .....	21
2. MARCO REFERENCIAL.....	21
2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	24
2.1.1 IRRADIACIÓN SOLAR.....	24
2.1.2 POSICIÓN DEL SOL.....	26
2.1.3 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA .....	27
2.1.4 TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	30
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA.....	32
2.2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA .....	32
2.2.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA INSTALACIÓN .....	32
2.3 SEGUIDORES SOLARES .....	40
2.3.1 SEGUIDORES DE UN EJE.....	41
2.3.2 SEGUIDOR DE DOS EJES .....	43
2.3.3 SEGUIDOR POR PUNTO LUMINOSO.....	44
2.3.4 SEGUIDOR CON PROGRAMACIÓN ASTRONÓMICA.....	44

2.3.5	FUNCIONAMIENTO DE UN SEGUIDOR SOLAR.....	45
2.4	TÉRMINOS BÁSICOS.....	46
Capítulo III .....		51
3.	DESARROLLO DEL SEGUIDOR SOLAR.....	51
3.1	ESTRUCTURA MECÁNICA DE SEGUIMIENTO SOLAR .....	51
3.2	SENSOR DE PUNTO LUMINOSO .....	55
3.3	COMPONENTES ELECTRONICOS DE CONTROL .....	58
3.4	CONEXIONADO Y ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS .....	61
3.5	SISTEMA SUPERVISORIO EN LABVIEW .....	63
Capítulo IV .....		66
4.	RESULTADOS .....	66
4.1	SISTEMA ESTATICO .....	66
4.2	SISTEMA CON SEGUIDOR SOLAR.....	69
4.3	CONSUMO DE POTENCIA SISTEMA DE CONTROL.....	70
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS .....	71
Capítulo V .....		79
5.	CONCLUSIONES.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		81
ANEXO I. MANUAL DE INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE KDM SOLAR ENERGY MONITORING SYSTEM 3.0.....		84

# Lista de Figuras

<b>Figura. 1. Capacidad mundial de energía solar fotovoltaica 2005-2015[10]</b> ...	24
<b>Figura. 2. La irradiación solar</b> .....	25
<b>Figura. 3 La posición aparente del Sol</b> .....	26
<b>Figura. 4. Efecto fotovoltaico</b> .....	27
<b>Figura. 5. Curva característica I-V[14]</b> .....	28
<b>Figura. 6. Respuesta espectral de la celda solar[14]</b> .....	29
<b>Figura. 7. Clasificación de celdas fotovoltaicas según tecnologías de fabricación</b> .....	30
<b>Figura. 8. Sistema Fotovoltaico On Grid con monitoreo</b> .....	33
<b>Figura. 9. Caja de conexión a la red eléctrica y protecciones</b> .....	34
<b>Figura. 10. KDM Solar Energy Monitoring System 3.0</b> .....	34
<b>Figura. 11. WVC System Power Line Filter</b> .....	35
<b>Figura. 12. WVC Modem</b> .....	36
<b>Figura. 13. Micro Inversor WVC-600</b> .....	37
<b>Figura. 14. Esquema de hasta 100 Micro inversores conectados a un modem[14]</b> .....	37
<b>Figura. 15. Paneles fotovoltaicos monocristalinos Semi-flexibles[14]</b> .....	40
<b>Figura. 16. Vista en Google Maps de la cubierta de la institución para ampliación del proyecto</b> .....	41
<b>Figura. 17. Seguidor solar de un eje</b> .....	42
<b>Figura. 18. Seguidor Solar de un eje acimutal[20]</b> .....	43
<b>Figura. 19. Movimientos de un seguidor solar de dos ejes.[20]</b> .....	44
<b>Figura. 20. Esquema de funcionamiento del seguidor solar</b> .....	45
<b>Figura. 21. Estructura mecánica para seguimiento de altura y acimut solar</b> .	52
<b>Figura. 22. Aplicación de anticorrosivo para disminuir efectos corrosivos atmosféricos</b> .....	52
<b>Figura. 23. Estructura de soporte para los paneles fotovoltaicos</b> .....	53

<b>Figura. 24. Acople de estructuras y ubicación del sistema de seguimiento.</b>	<b>.54</b>
<b>Figura. 25. Anclaje de estructura con tiros de impacto.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura. 26. Soldadura de conectores de celdas fotovoltaicas .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura. 27. Uso de materiales para encapsulado del sensor. ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura. 28. Sensor de irradiación solar .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura. 29. Diagrama de Conexión del sistema embebido y los motores DC.</b>	<b>58</b>
<b>Figura. 30. Instalación eléctrica con tubos y cables según normas del RETIE .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura. 31. Interface de control del sistema de seguimiento .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura. 32. Diagrama de bloques control en Labview .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura. 33. Configuración de la opción Web Server en Labview .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura. 34. Configuración Web Publishing Tool en Labview para acceso remoto.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura. 35. <i>Posicionamiento de paneles solares con aplicativo móvil PV Solar Power System en marzo de 2017.</i>.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura. 36. Generación de potencia en 7 días continuos con sistema estático. ....</b>	<b>68</b>
<b>Figura. 37. Generación de potencia en 7 días continuos con punto luminoso .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura. 38. Grafica comparativa de generación solar del mismo día en semanas diferentes y contiguas.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura. 39. Correlación lineal de los ángulos reportados en la mañana.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura. 40. Ajustes no lineales para datos obtenidos durante la mañana .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura. 41. Correlación lineal de los ángulos reportados en la tarde .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura. 42. Posicionamiento de paneles solares con aplicativo móvil PV Solar Power System .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura. 43. Generación de potencia para los días 13 y 15 de abril con el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura. 44. Registro de potencia por el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0 durante abril .....</b>	<b>78</b>

# Lista de Tablas

<b>Tabla 1. Características eléctricas de la celda fotovoltaica .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 2. Características de los paneles fotovoltaicos implementados .....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 3. Parámetros WVC-600 .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 4. Reporte de condiciones atmosféricas en Floridablanca según AccuWeather .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 5. Características AtMega 2560 según fabricante .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 6. Características Chip BTS7960 según fabricante .....</b>	<b>60</b>
<b>Tabla 7. Características L298n según fabricante .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 8. Certificados de conformidad de cables eléctricos[24] .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 9. Consumo de potencia diario del sistema de control.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 10. Registro de potencias generadas durante 14 días del mes de marzo. ....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 11. Registro de ángulos de inclinación perpendicular a la irradiación directa de sol por la mañana.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 12. Registro de ángulos de inclinación perpendicular a la irradiación directa de sol por la tarde .....</b>	<b>75</b>
<b>Tabla 13. Valores de potencia para diferentes horas del día con y sin seguimiento solar .....</b>	<b>77</b>



**DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO SOLAR APLICADO A UN SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA SOLAR/CONVENCIONAL EN EL COLEGIO GONZALO JIMÉNEZ NAVAS DE FLORIDABLANCA - SANTANDER**

Jackson A. Pérez; Ivaldo Torres Chávez  
Grupo Logos, Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia

## **Resumen**

En este trabajo se presenta el resultado de la implementación de un sistema de seguimiento solar controlado, para aumentar la generación de energía eléctrica a partir del sistema fotovoltaico On Grid de la institución. Se utilizó el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0 para monitorear la potencia generada por el sistema On Grid. Se determinó que por medio de sistemas controlados de seguimiento de dos ejes se obtienen aumentos mayores al 30 % de la potencia generada respecto a un sistema estático con la mejor orientación, para la posición geográfica y época de la zona analizada. Se desarrolló una interfaz gráfica en Labview que permite controlar la estructura y supervisarla desde un acceso remoto a la instalación.

**DEVELOPMENT OF A CONTROLLED SOLAR TRACKING STRUCTURE FOR AN ON GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM AT GONZALO JIMÉNEZ NAVAS SCHOOL IN FLORIDABLANCA, SANTANDER, COLOMBIA**

Jackson A. Pérez; Ivaldo Torres Chávez  
Grupo Logos, Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia

## **Abstract**

This paper presents the results of the implementation of a controlled solar tracking system to increase the generation of electric energy from the On Grid photovoltaic system of the institution. The KDM Solar Energy Monitoring System 3.0 software was used to monitor the power generated by the On Grid system. He determined that by means of controlled tracking systems of two axes, increases over 30% of the generated power are obtained, with respect to a static system with the best orientation, for the geographical position and the ephoc of the analyzed area. A graphical interface was developed in Labview that allows to control the structure and to supervise it from a remote access to the installation.

# Capítulo I

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día se evidencia una agudización de los problemas que históricamente han venido afectando el ambiente y la calidad de vida en el planeta Tierra. La contaminación, las inequidades sociales, la desertización, entre otros; se constituyen en situaciones que responden a un modelo de desarrollo economicista, fundamentado, entre otros principios, en el de la desigualdad. Es una realidad que requiere de una intervención sistemática y profunda para lograr transformaciones de comportamientos que apunten al logro de una ciudadanía concienciada y competente para intervenir asertivamente desde su saber y quehacer local. Desde esta perspectiva se justifica el valor y la relevancia creciente por la investigación y masificación de modelos de producción que aminoren el impacto ambiental del planeta.

La crisis ambiental, gestada fundamentalmente después de la primera Revolución Industrial con la intensificación y multiplicación de los procesos socioeconómicos y tecnológicos, se ha acelerado de forma acentuada a partir de la segunda mitad del siglo XX ocasionando múltiples consecuencias, entre las más destacadas se encuentran los efectos del cambio climático sobre el planeta. No obstante, también la tecnología ha evidenciado notables avances que bien pudieran contribuir a prevenir daños y mitigar impactos ambientales, dentro de los cuales se destaca la sustitución de la explotación de los combustibles fósiles por el uso de las Fuentes No Convencionales de Energías Renovables.

De acuerdo con la importancia del planteamiento precedente, ya algunos países del mundo y de la región Suramericana han venido desarrollando diferentes experiencias vinculadas al uso de Sistemas Fotovoltaicos Autonomos (SFA) y al desempeño de sistemas de seguimiento de dos ejes, en comparación con sistemas de inclinación fija, los cuales poseen un ángulo óptimo para diferentes posiciones geográficas y épocas del año.

En el caso particular del Colegio Gonzalo Jiménez Navas (CGJN ), las consideraciones políticas del municipio al que pertenece este centro educativo, en cuanto a la posible dotación de paneles solares para hacer la institución

autosuficiente, han contribuido a justificar los hallazgos del investigador del presente estudio, teniendo en cuenta que su importancia es indiscutible con relación al aporte significativo que guarda para el mejoramiento de la calidad ambiental de este centro educativo y de la comunidad.

En este sentido y atendiendo las necesidades que impele la política ambiental y energética colombiana, se desarrolló e implementó un SFA On Grid, sobre una estructura de seguimiento solar, que permite ser monitoreado y controlado por medio de Labview, desde un acceso remoto a la instalación. Los equipos basados en sistemas On Grid permiten conexión directa a la red eléctrica, reduciendo el costo del sistema, por el no uso de sistemas de almacenamiento (baterías). El objetivo fue encontrar cual es el aumento en la generación de potencia del sistema de dos paneles fotovoltaicos monocristalinos semi-flexibles de 120 W, con respecto a una estructura con la posición estática encontrada mediante la aplicación PV Solar Power System para diferentes días soleados del mes de marzo y abril de 2017. Se hace uso de sistemas embebidos compatibles con Arduino para la conexión con los motores DC.

Es importante mencionar que, el presente trabajo estará adscrito a la Maestría en Controles Industriales que se administra en la Universidad de Pamplona, razón por la cual se constituye en una tesis Magistral que podría contribuir a enriquecer la base de datos de las producciones investigaciones clasificadas de la Biblioteca José Rafael Faría Bermúdez. Al respecto, se destaca que en la revisión previa realizada en la base de datos de la biblioteca se ubicaron trabajos relacionados con esta temática en particular, razón por la cual, se considera que esta investigación podría ser un aporte complementario útil para el proceso investigativo en la Universidad.

Este Trabajo de investigación magistral consta de cinco capítulos. El primer capítulo es denominado Planteamiento del Problema. En esta parte se hace referencia al Contexto de Estudio, la justificación de la investigación; al Objetivo General y a los Objetivos Específicos y finaliza con la presentación de los alcances e Importancia de la investigación.

El segundo capítulo denominado Marco Referencial, incluye los Antecedentes y algunas experiencias vinculadas con el estudio. Seguidamente se presentan las Bases Teóricas y se consideró importante, incorporar una Definición de Términos Básicos, en virtud de las especificidades de la temática de la investigación y de la regulación energética actual Colombiana.

En el tercer capítulo se expone el desarrollo del control y la implementación de la estructura de seguimiento. En este apartado se presenta la estructura mecánica; el sensor utilizado; las Características de los componentes implementados; el conexionado y el sistema supervisorio resultante.

El capítulo cuatro contiene los resultados obtenidos del estudio del sistema On Grid durante los meses de marzo y abril con y sin seguimiento solar. Además presentamos resultados de otra estrategia de seguimiento denominada cartas solares; los resultados se obtuvieron con apoyo de la herramienta software KDM Solar Energy System Monitoring 3.0 para monitoreo del sistema On Grid; cuyo manual de instalación y configuración se ha incluido como Anexo I.

El proyecto de investigación finaliza con el capítulo cinco, donde se presentan las conclusiones y posteriormente se exponen las Referencias citadas durante el desarrollo del trabajo escrito que se presenta a continuación.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

De acuerdo con las observaciones preliminares realizadas por el docente investigador, quien realiza este trabajo, se podría decir que los estudios relativos al uso de las fuentes renovables de energías, también conocidas como fuentes no convencionales de energía, han sido poco tratados en el CGJN; aun cuando la institución realizó el esfuerzo para la adquisición de un sistema de paneles fotovoltaicos On Grid y un aerogenerador para fomentar la investigación y el interés de los estudiantes que hacen vida en esta institución.

De otro lado, el actual interés del municipio de dotar a las instituciones de Floridablanca de sistemas fotovoltaicos para la generación de la energía que se utiliza en los planteles para su funcionamiento y considerando la visión de futuro con relación al uso de las energías renovables a escala mundial y las limitantes expuestas por Figueroa et al., 2015 sobre el uso de los SFA[1], interesa para los fines de esta investigación, implementar el SFA On Grid sobre una estructura de seguimiento solar controlada y comparar su rendimiento con el mismo sistema en una posición fija.

En este sentido, también se constituye en interés a futuro para el estudio, el cómo los estudiantes hacen transferencia de lo observado durante el proceso de

reflexión-investigación en su contexto social que articula las relaciones familia-escuela y comunidad.

En congruencia con los planteamientos precedentes emergen los siguientes interrogantes de la investigación, que a posteriori dan cuenta del Objetivo General y los Objetivos Específicos del estudio.

### **1.1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

Teniendo en cuenta la problemática planteada, enfocada en la parte operacional, de control, monitoreo y de seguimiento de los SFA, nos conduce a algunas preguntas que se pretenden responder con la presente investigación:

¿Es importante el estudio de los SFA On Grid y la implementación de seguidores solares que generen impacto en la comunidad?

¿Es posible implementar un SFA en una estructura de seguimiento solar de dos ejes controlada con elementos y componentes electrónicos accesibles en el mercado local?

¿Es posible determinar el aumento de rendimiento del SFA On Grid fijo y con la estructura de seguimiento solar?

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Las fuentes no convencionales de energía, en la mayoría de los casos, suelen no ser suficiente para suplir las necesidades de energía eléctrica de un sector; en otras palabras, los sistemas de autogeneración a pequeña escala, actualmente se encuentran lejos de reemplazar por completo a las fuentes convencionales de energía.

Sin embargo, en busca de brindar soluciones a este problema y de minimizar el impacto que causan las fuentes convencionales; se crean los denominados sistemas híbridos de energía (On Grid), los cuales basan su funcionamiento a partir de dos o más fuentes de energía para suplir de manera ininterrumpida de energía eléctrica de un sector. En nuestro caso, se suministrará energía a una sala de informática de la institución, por medio de un sistema de dos paneles fotovoltaicos de 120 W y la red eléctrica convencional. Tomando como fuente

primaria la obtenida del Sol. Se esperan obtener algunos indicadores que permitan determinar la viabilidad de ampliación del sistema de paneles, su ubicación y posicionamiento.

Otro de los aspectos fundamentales por los cuales se plantea la realización este proyecto es la necesidad de incentivar el uso de este tipo de energías en esta zona, para fomentar y concientizar a los estudiantes y a la comunidad en general sobre el uso de estas energías, en pro del desarrollo económico, ambiental y tecnológico de la región y del país.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un controlador de seguimiento solar aplicado a un sistema híbrido de energía solar/convencional en el Colegio Gonzalo Jiménez Navas de Floridablanca - Santander

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Documentar el estado del arte y estudiar conceptos y aplicaciones de seguidores solares para SFA, controladores; así como su impacto para la comunidad.
2. Implementar el SFA interconectado con la red, que funcionaría como primera fase del proyecto en la institución.
3. Diseñar e implementar el controlador en sistemas embebidos de bajo costo para el sistema de seguimiento solar.
4. Realizar el acoplamiento entre el módulo de seguimiento y el SFA y compararlo con el sistema de inclinación fija.

## 1.4 CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Hasta el siglo XVIII, la energía utilizada por la humanidad estaba principalmente limitada a la energía humana, al esfuerzo físico de los animales, a la combustión de leña, al uso del viento o de los saltos de agua para accionar los molinos y las bombas. Tales fuentes de energía tenían la limitación de transporte: no se podían manipular ni mover a grandes distancias de manera fácil y expedita. Por el contrario, los combustibles fósiles, principal fuente energética utilizada a partir de la Revolución Industrial, podían transportarse con mayor facilidad, lo que permitió tener una mayor movilidad entre el sitio de extracción del combustible y el lugar en que se utilizaba. Aunque el carbón se había explotado durante muchos siglos, durante la era industrial del siglo XIX, su consumo aumentó y su utilización tuvo un gran auge, principalmente debido al avance de las tecnologías y de los procesos industriales a gran escala, así como de nuevos medios de transporte. Desde entonces, la humanidad ha presenciado un incremento significativo en el consumo de energía per cápita en los países industrializados[2].

Durante el siglo XX, la contribución del carbón a la matriz energética mundial declinó, lo que favoreció el uso del petróleo, el gas y los combustibles nucleares. La producción de energía a partir de combustibles fósiles tiene efectos nocivos sobre la biosfera a corto, mediano y largo plazo. La combustión libera anhídrido carbónico, óxidos de azufre, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y partículas sólidas que contaminan el suelo, el agua y la atmósfera, provocando, entre otros efectos, el calentamiento global debido a la emisión de gases efecto invernadero[2].

Después de la Cumbre de París (*COP21*) (2015), prácticamente la totalidad de los países participantes han dirigido sus miradas al uso las energías renovables como una vía clave en la procura de la sostenibilidad energética, esto considerando que más de dos tercios de las emisiones mundiales de *gases de efecto invernadero* (GEI) se deben al sector de la energía. A partir de este planteamiento, la Agencia

Internacional de las Energías Renovables (*IRENA*) estima que para cumplir con el *Acuerdo de París* hará falta duplicar la instalación de energías de origen renovables en los próximos 15 años.

Colombia no se ha quedado a la zaga en todos los avances precedentes y con el objeto de promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético, promulgó la Ley 1715 de 2014, "Por medio de la cual se regula la integración de las Energías Renovables No Convencionales al Sistema Energético Nacional.", que busca además, promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda[3].

En correspondencia con el marco regulatorio de la Ley 1715 (2014), igualmente se promulgaron diversos decretos, dentro de los cuales se encuentran:

1. Decreto 2143 de 2015 "Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014."
2. Resolución UPME 0281 de 2015 "Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala"
3. Resolución CREG 024 de 2015 "Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)"
4. Decreto 1623 de 2015 "Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de



política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas"

5. Decreto 2492 de 2014 "Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda"
6. Decreto 2469 de 2014 "Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración"

## **1.5 ALCANCES ESPERADOS**

Con la ejecución de este proyecto de investigación se conseguirán varios alcances o impactos en forma de aportes científicos:

1. Aporte en el monitoreo y control de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos On Grid, orientado al diagnóstico desde un acceso remoto de la potencia generada, reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, reducción de los costos monetarios de generación, mantenimiento y personal técnico.
2. Aporte en la integración de diferentes ramas de la ingeniería, como el control Industrial, la ingeniería electrónica, eléctrica, de telecomunicaciones y de sistemas, en la solución de necesidades y avances en el campo de las fuentes de energía no convencionales.
3. Aporte en la versatilidad que tendría el sistema en la administración de potencia generada en sistemas fotovoltaicos autónomos On Grid.
4. Aporte en el uso y aplicación de sistemas sin baterías, para dar solución a problemas de costos elevados y poca masificación de los sistemas fotovoltaicos en las zonas interconectadas.
5. Aporte en el desarrollo de acciones, que partiendo de un diagnóstico inicial, permitan generar planes, propuestas y fórmulas para reducir de forma real las emisiones de CO<sub>2</sub> en el centro educativo.
6. Aporte a la solución de la problemática nacional e internacional en cuanto a la sustitución de los combustibles fósiles y reducción del impacto del calentamiento global.

## **1.6 PERTINENCIA RESPECTO A LA REGIÓN**

La República de Colombia tiene 1'141.748 kilómetros cuadrados de superficie, incluyendo San Andrés y Providencia. Cuenta con una población de 45 millones de habitantes aproximadamente. Dentro de sus características geográficas se destaca su clima tropical, matizado por la altitud y sus cordilleras Occidental, Central y Oriental (Trifurcación de la cordillera de Los Andes). Sus ríos más importantes son: Magdalena, Cauca, Meta, Guaviare, Caquetá, Putumayo, Atrato, Vaupés y Vichada. Su lengua oficial es el español y se caracteriza por ser un país rico en recursos naturales renovables y no renovables, además por su posición geográfica posee un gran potencial para el uso de energías renovables[4].

El CGJN está ubicado en el departamento Santander - Colombia. El departamento Santander cuenta con una superficie de 30.537 km<sup>2</sup> lo que representa el 2.7 % del territorio colombiano. Su capital es Bucaramanga. Está dividido en ochenta y siete (87) municipios, dentro de los cuales se encuentra el de Floridablanca. En el relieve del territorio del departamento de Santander se distingue dos grandes unidades fisiográficas denominadas Valle Medio del Magdalena y la cordillera Oriental. El clima del departamento de Santander se ve afectado por la diversidad de altitud, la cual proporciona pisos térmicos y paisajes diferentes. Sus tierras se distribuyen en los pisos térmicos cálidos, templados y bioclimático páramo[4].

De acuerdo con los datos aportados por la Academia de Historia de Santander (2012), la sociedad santandereana fue evolucionando en cuatro momentos históricos conocidos como: (a) Sociedad Prehispánica; (b) Colonización española; (c) Emancipación de la Corona Española y (d) Época Contemporánea.

Los cambios durante este siglo han transformado la economía del departamento de Santander, la economía de este departamento de ser históricamente agrícola, pasó a ocupar un papel destacado en el sector servicios, especialmente en el área del transporte y de las comunicaciones. La industria también presenta dos polos de desarrollo localizados en la zona que abarca el eje Bucaramanga - Girón - Piedecuesta, aquí se encuentran las empresas relacionadas con la alimentación, textiles, cemento, accesorios automotores, calzado, tabaco y la industria avícola, y la zona de Barrancabermeja que se dedica completamente a la refinación de la mayor parte del petróleo que se consume en Colombia, además de la fabricación de los derivados de este combustible natural [4].

El CGJN se ubica en el departamento Santander - municipio de Floridablanca, en el barrio la Cumbre, fue aprobado oficialmente por la Secretaría de Educación Municipal de Floridablanca para administrar los niveles de preescolar, básica y media según resolución 116 del 27 de noviembre de 1992. Considerando el cometido institucional precedente, la formación ambiental y tecnológica de los estudiantes del CGJN adquiere una relevancia creciente, por cuanto responde a los fines y metas establecidas a nivel local, nacional e internacional vinculadas con el respeto y cuidado de las relaciones propias de la naturaleza para la preservación de todas las expresiones de vida. Esto se explica porque, aun cuando hagan uso de los recursos naturales y de los avances de la ciencia y la tecnología para la subsistencia, su formación profesional debe proveerle de un conjunto de conocimientos, actitudes, valores y competencias que le permita establecer una relación equilibrada y armónica con el ambiente.

Al respecto, es importante destacar que en concordancia con la Ley 1715 (2014), actualmente se impulsa en Colombia un ambicioso Plan Nacional para el uso de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FN CER), definidas en este documento como:

Aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FN CER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.

Tal como se evidencia, estas fuentes alternativas son las que se derivan y aprovechan de los recursos renovables. En este sentido, es importante considerar que, en la medida que aumenta la población y crece la industrialización de los países, mayor será el consumo de energía. Tal premisa, conduce a reflexionar sobre el principio de finitud de los recursos, aun cuando estos sean renovables.

Ciertamente los recursos naturales renovables están vinculados con el ciclo natural de la vida en el planeta y se encuentran disponibles de forma permanente e inmediata en la naturaleza, no obstante, su uso también debe considerar cierta racionalidad, valores y comportamientos ambientales que permitan viabilizar su existencia y durabilidad para el uso y disfrute de las generaciones presentes y futuras. Tal concepción respecto a la relación ser humano-naturaleza, justifica la importancia de la Educación Energética (EE) para promover el uso adecuado de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FN CER).

Tal situación, se constituye en un punto de inicio de esta investigación, sobre todo, considerando el auge que cobra actualmente el uso de las FNCER internacionalmente y en Colombia de cara al futuro. Al respecto, el informe presentado por la Compañía Financiera de Inversiones a Nivel Mundial, citado por Ecoportal (2015) ya deja ver hacia donde avanza el mundo en términos de sostenibilidad ambiental, al expresar que:

La capacidad de producción de energía en el 2040 será más del doble que en la actualidad. De la nueva generación de energía adicional, el 60% va a venir expresada por las energías renovables (...) El primer hito de favorecer esta fecha es que en el 2026 el viento se convertirá en la forma más barata de generación de energía en el mundo (...) Desmarcado en el 2030 por una generación de paneles solares con un alta eficiencia y tecnología[4].

Tal como se evidencia, las sociedades están avanzando con pasos firmes hacia el uso de las energías renovables que, sin duda, alientan el logro por aproximación sucesiva de 1 de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) acordados en la Organización de las Naciones Unidas en 2015.

## Capítulo II

### 2. MARCO REFERENCIAL

A continuación se presentarán los Antecedentes del Estudio a escala nacional e internacional. Seguidamente se expondrán las Bases Teóricas que sustentarán el estudio y posteriormente, se considera necesario exponer los Términos Básicos utilizados durante el desarrollo del trabajo escrito que da cuenta del proceso de esta investigación, esto, en virtud de las especificidades técnico-científicas del tema de estudio.

#### **Antecedentes del Estudio**

A continuación se presentaran los antecedentes de la investigación, definidos por Claret (2012) como “Un compendio de síntesis de trabajos previos que hayan brindado un tratamiento previo al tema de estudio y puedan dar un contexto preliminar a la investigación, pueden ser: trabajos de investigación, trabajos de ascenso, artículos, resultados de foros, conferencias y seminarios”[5].

Se realiza un estudio del estado del arte sobre el desempeño de sistemas de seguimiento de dos ejes, en comparación con sistemas de inclinación fija, los cuales poseen un ángulo óptimo para todo el año. Esta revisión se realiza en diferentes países del mundo, en algunas ciudades que poseen diferentes condiciones climáticas. En dichos estudios se compara la generación de electricidad con el seguimiento solar de dos ejes restándole el consumo de los dispositivos que realizan el seguimiento, para obtener un valor de energía neto aportado por estos sistemas.

Para cada una de las condiciones climáticas los ángulos de inclinación óptimos fueron calculados de acuerdo a la latitud y condiciones de cada una de las ciudades estudiadas.

Algunos estudios en cuanto al aumento del desempeño para la instalación de montajes con seguimiento solar de dos ejes se presentan a continuación:

Maatallah, El Alimi, & Nassrallah en 2011 investigaron el desempeño diario de un sistema de seguimiento de dos ejes para un panel fotovoltaico en la ciudad de Monastir, Túnez. El estudio concluyó que los beneficios obtenidos por el sistema

de dos ejes en relación con un panel fijo tradicional alcanzan el 30 % y el 44 % en los días soleados de invierno y de verano respectivamente[6].

En España Cruz-Peragón et al., a principios de 2011 analizaron el desempeño teórico con el objetivo de cuantificar el beneficio que se obtenía con el empleo de un seguidor solar de dos ejes, así como la viabilidad económica de tal sistema, estimando una generación de energía anual entre el 21 y 25 %[7]. Poco tiempo después, Bayod-Rújula, Lorente-Lafuente, & Cirez-Oto estimaron que un seguidor solar de dos ejes ofreció un beneficio de salida de energía del 31 % con respecto a una posición de inclinación óptima fija. Estudiando una producción de 26.46kW en la instalación de Zaragoza[8]. Y finalmente Gómez-Gil, & Wang, realizaron una comparación en la generación de energía en sistemas fotovoltaicos reales instalados en el sur del país mediante cuatro configuraciones diferentes. Su estudio concluyó que el beneficio anual del sistema de seguimiento de dos ejes en comparación con uno fijo es del 25.2 %[9].

De manera similar, a nivel de América Latina se han realizado algunos estudios en relación al mismo tema como por ejemplo el de Guardado & Rivera en 2012 en el Salvador, donde se realizaron mediciones de irradiación solar diaria por un periodo de 6 semanas en los meses de abril y mayo, tanto del sistema fijo como del sistema con seguimiento, y se obtuvo un incremento promedio de aproximadamente el 20% en las mediciones de insolación por parte del sistema con seguimiento solar, con respecto al sistema fijo a 14° de inclinación orientado al Sur. Ellos concluyeron que en los días con alta nubosidad se percibieron incrementos reducidos en la insolación, que es la que aprovechan mayormente los sistemas con seguimiento solar[10]. Y en la ciudad de Tacna en Perú, Gonzales, Cohaila, & Paredes en 2008 encontraron que en un seguidor solar a pequeña escala de un solo eje, la generación se aumenta entre un 15 y 20%. En contraste a un seguidor solar de dos ejes, con el cual se logra aproximadamente del 35 al 40% de eficiencia en sistemas de gran potencia[11].

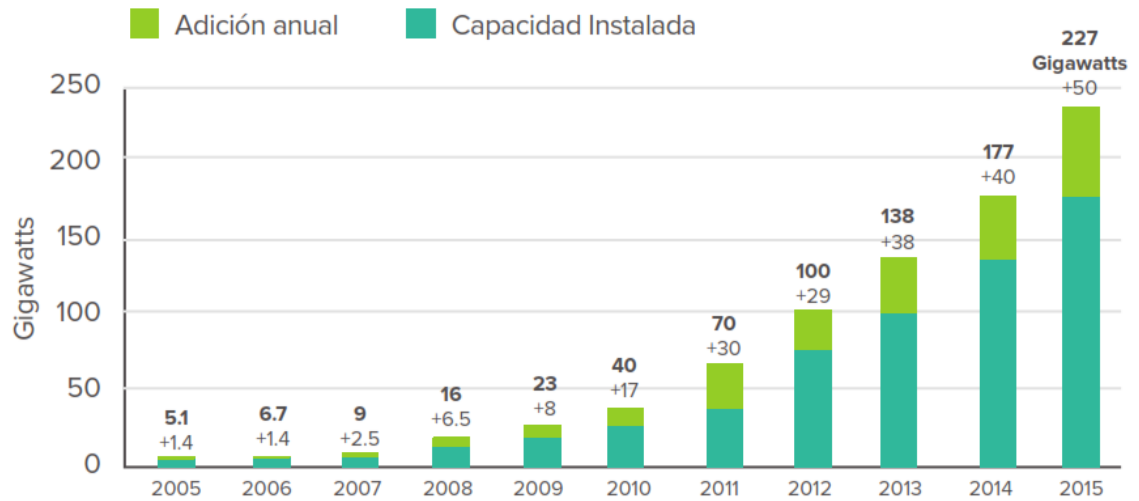
Es evidente que el seguidor solar de dos ejes por medio de motores aumenta considerablemente la generación de energía anual de un SFA; sin embargo, estos requieren de una inversión significativa moderada para mejorar el funcionamiento del sistema total. Por ésta razón, su utilidad y eficacia tienen que ser examinadas antes de su puesta en práctica. Además, hay que tener en cuenta que algunos de los estudios aquí consultados, fueron hechos en latitudes entre los 30 y 40° Norte; en países donde se presentan estaciones de invierno. Por lo tanto, es inseguro asumir que un seguidor de dos ejes ofrece un beneficio similar en la generación de electricidad para la latitud en la que se encuentra Colombia, que está por debajo

de los 10° Norte. El objetivo de estudios futuros es encontrar ángulo de posición fijo óptimo, al realizar la comparación entre la generación de energía anual del sistema de seguimiento construido y el mismo sistema fotovoltaico instalado en una posición de inclinación fija anual.

Dentro de los antecedentes del estudio a gran escala nacional, se destaca el IX Simposio Internacional de Energía, el cual como cierre del mayor evento académico del IPSE, los conferencistas invitados al Simposio Internacional, realizaron una visita técnica a Isla Fuerte, Bolívar. Donde el Ministerio de minas y energía instaló en 2008 un sistema de paneles y seguidores solares con el fin de incrementar el servicio de energía al Centro de Salud e Institución Educativa de la isla. El sistema consta de dos seguidores solares de 12,5 kW[12].

Al igual que en Isla Fuerte, se instalaron dos sistemas de seguidores solares de 25 KWp nominales en Nazareth del municipio de Uribia, en el departamento de La Guajira y otros dos con la misma capacidad de generación en Puerto Estrella del mismo municipio. Los seguidores solares cumplen con los siguientes requisitos mínimos: resisten ráfagas de viento hasta 60 Km/h en posición de trabajo y de 110 Km/h en posición de defensa; cada sistema de seguidores solares ocupa un área máxima de 300 metros cuadrados. Los inversores y equipos de sincronismo están conectados a un sistema trifásico de 208/120VAC - 60HZ con neutro, barraje existente donde simultáneamente se conectan las plantas y otros sistemas alternos. El sistema cuenta con un control remoto y/o local para telemetría, con estación meteorológica normalizada para medir y recolectar los datos de las variables de viento y radiación solar. Estos datos se suministran a la unidad de monitoreo del sistema. De igual manera, los seguidores solares cumplen con características físicas de material resistente a las condiciones salinas del ambiente e inyectan la potencia en forma directa a la red (no hay banco de baterías), conectándose al respectivo sistema de acople y sincronización existente[13].

Finalmente y para complementar la importancia del estudio, de acuerdo al REN21iv (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) citado por INNCOM (2016) en su reporte anual, el 2015 fue un año histórico en el mercado de la energía solar fotovoltaica, teniendo en cuenta que el crecimiento anual de la capacidad añadida fue 28,25% más en comparación con el 2014. En el 2015, se instalaron más de 50 GW (Gigawatts), logrando así una capacidad instalada de 227 GW a nivel mundial[14]. En la Figura. 1 se muestra la capacidad mundial instalada y la adición anual histórica desde el 2005 de energía solar fotovoltaica.



**Figura. 1. Capacidad mundial de energía solar fotovoltaica 2005-2015**[14]

De la Figura. 1 se puede extraer información de cómo el mercado mundial de este tipo de energía renovable ha incrementado de forma exponencial en la última década, ya que pasó de 1.4 GW anuales en 2005 a instalarse 50 GW en 2015. “En los últimos años, la demanda de esta tecnología se concentró en países desarrollados como China, Alemania, Japón, Estados Unidos, por mencionar algunos; sin embargo, hoy en día, economías emergentes” como Colombia han comenzado a contribuir significativamente con el crecimiento mundial[14].

El crecimiento acelerado de la energía solar fotovoltaica se debe al incremento en la competitividad de la industria de paneles fotovoltaicos, así como a los programas gubernamentales y pactos internacionales, que buscan mejorar la calidad de vida de sus habitantes al brindarles electricidad y reducir las emisiones de gases contaminantes del medio ambiente generados por la quema de combustibles fósiles y fuentes de energía eléctrica convencionales.

## **2.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

### **2.1.1 IRRADIACIÓN SOLAR**

La radiación electromagnética en forma de ondas que recibimos del sol es la principal fuente energética de las energías renovables. La radiación solar que llega a la atmosfera sufre diferentes distorsiones, debido a las condiciones climáticas, la topografía, los diferentes pisos térmicos, la posición geográfica, la hora del día y



época de año. Es decir, la radiación solar en cualquier lugar de la tierra e instante es diferente.

La irradiación solar que llega a la superficie terrestre se divide en tres componentes principales[15]:

1. Radiación directa: es la radiación que llega a la superficie de la tierra sin sufrir cambios en su dirección
2. Radiación difusa: Se produce por la dispersión de la radiación que se origina debido a la acción de los diferentes agentes atmosféricos.
3. Radiación reflejada: Es una fracción de la radiación solar que es reflejada por la tierra u objetos cercanos.



**Figura. 2. La irradiación solar**

Fuente: Autor

La luz solar es el espectro total de radiación electromagnética proveniente del Sol [16]. Esto es usualmente durante las horas consideradas como día. La luz solar

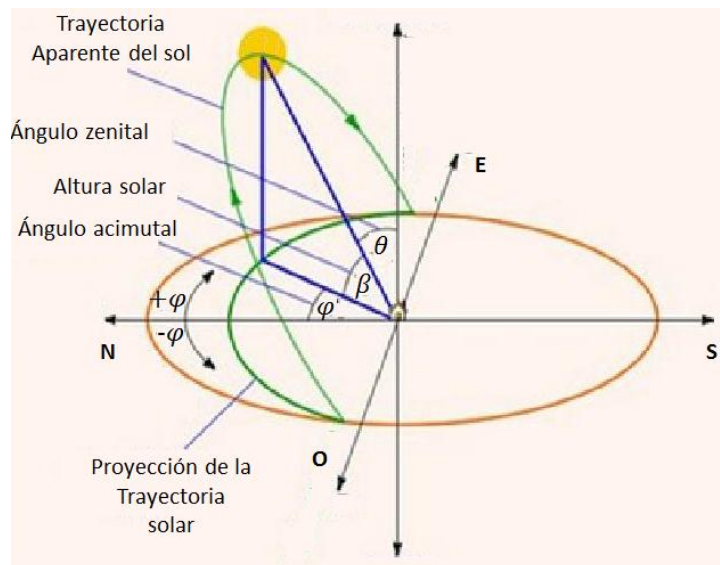
directa proporciona aproximadamente 93 lúmenes de iluminación por vatio de potencia electromagnética, incluyendo infrarrojo, visible y ultra-violeta como se presenta en la *Figura. 2*.

### 2.1.2 POSICIÓN DEL SOL

Al ubicarnos en una posición fija sobre la superficie terrestre, el Sol parece moverse a lo largo del cielo. La posición del Sol depende de la posición geográfica, la hora del día y la época del año. El ángulo en que la luz llega a la superficie terrestre varía por este movimiento aparente del sol, que es causado por la rotación de la tierra alrededor de su eje; e incide en la cantidad de energía recibida por las celdas fotovoltaicas. La posición del Sol se puede definir por dos ángulos[17]:

La **Altura solar**,  $\beta$ , es el ángulo formado entre el horizonte y la línea que une el centro del Sol con el punto de observación.

El **Acimut solar**,  $\phi$ , es el ángulo que mide cuanto está desplazado el Sol respecto del eje norte-sur.



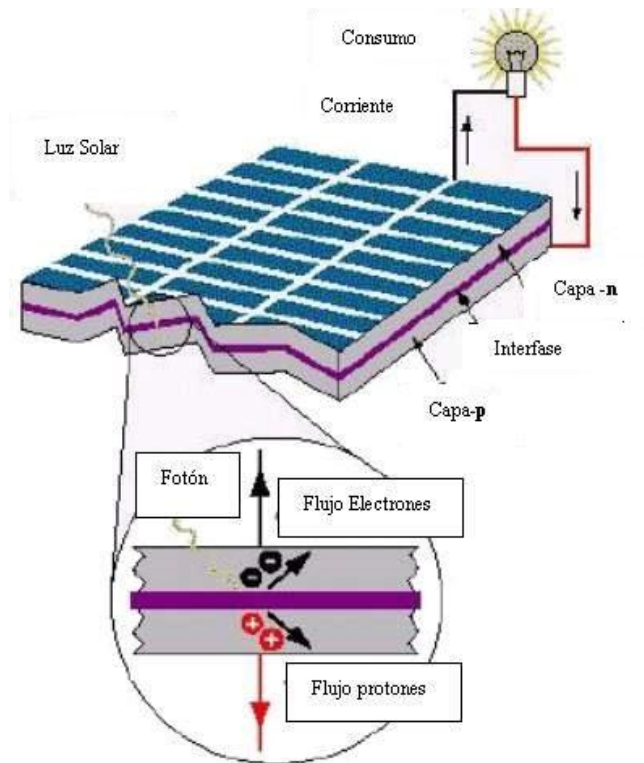
**Figura. 3 La posición aparente del Sol**

Fuente: Autor

En la Figura. 3 se presenta la trayectoria aparente del sol, observada en la ciudad de Floridablanca (Colombia), durante los primeros meses de 2017.

### 2.1.3 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es el proceso de transformar la luz solar en electricidad mediante celdas fotovoltaicas. Dentro de cada celda hay capas de un material semiconductor tratado específicamente para formar dos capas (positiva en una parte y negativa en la otra) con lo que se obtiene un campo eléctrico en dicho material. Cuando la luz solar (fotones) incide sobre la celda se liberan electrones a través de las capas formando una corriente eléctrica directa (ver Figura. 4).



**Figura. 4. Efecto fotovoltaico**

Fuente: Autor

Debido a la baja tensión de una celda fotovoltaica, aproximadamente 0,6 V, necesitan ser combinadas y conectadas entre sí. Un arreglo de varias celdas es conocido como panel fotovoltaico. A continuación se presentan las principales características suministradas por el fabricante de las celdas fotovoltaicas que conforman los paneles fotovoltaicos utilizados[18]

Una característica fundamental de la celda fotovoltaica es la curva corriente-tensión (I-V), la cual presenta diferentes combinaciones de corriente y voltaje que pueden obtenerse de una celda fotovoltaica frente a unas condiciones

determinadas. La Figura. 5 presenta la curva I-V proporcionada por el fabricante de la celda fotovoltaica utilizada.

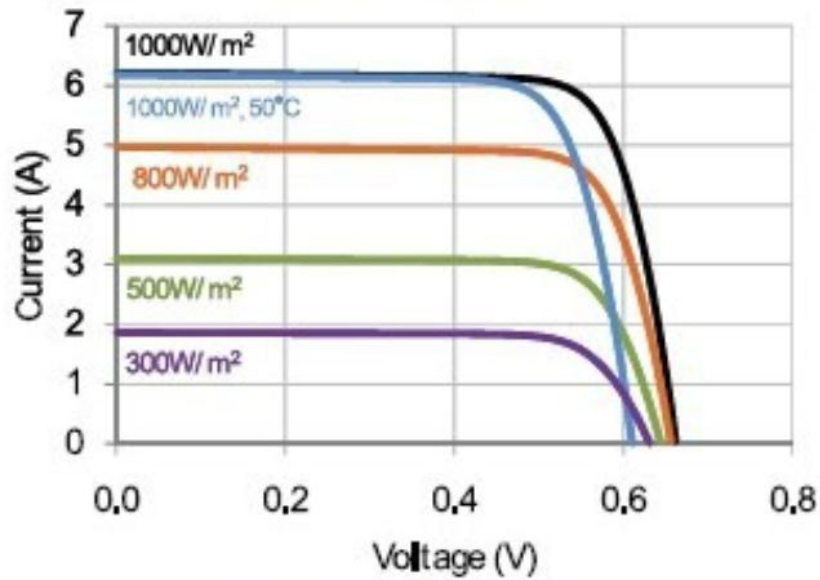


Figura. 5. Curva característica I-V[18]

Otros elementos importantes que obtiene el fabricante bajo parámetros determinados, se presentan en la **Tabla 1**.

**Tabla 1. Características eléctricas de la celda fotovoltaica**

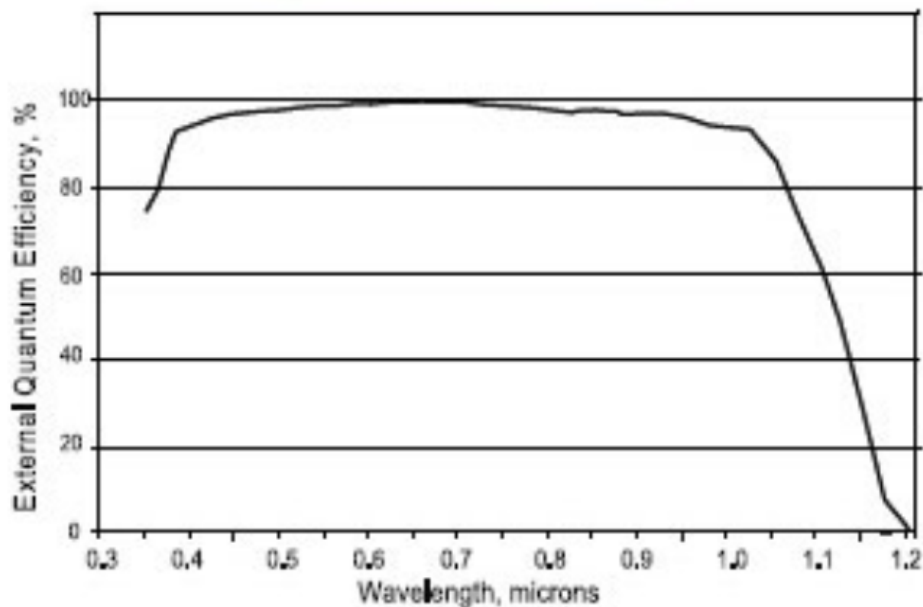
Electrical Characteristics of Typical Cell at Standard Test Conditions (STC)						
STC: 1000W/m <sup>2</sup> , AM 1.5g and cell temp 25 °C						
Bin	Pmpp (Wp)	Eff. (%)	Vmpp (V)	Impp (A)	Voc (V)	Isc (A)
G	3.34	21.8	0.574	5.83	0.682	6.24
H	3.38	22.1	0.577	5.87	0.684	6.26
I	3.40	22.3	0.581	5.90	0.686	6.27
J	3.42	22.5	0.582	5.93	0.687	6.28

All Electrical Characteristics parameters are nominal  
 Unlaminated Cell Temperature Coefficients  
 Voltage: -1.8 mV / °C      Power: -0.32% / °C

Estos elementos eléctricos característicos de las celdas fotovoltaicas son:

- ❖ Potencia en el punto máximo de potencia ( $P_{mpp}$ ): Es la máxima potencia que producirá la celda fotovoltaica para unas condiciones determinadas de temperatura y radiación solar.
- ❖ Eficiencia ( $Eff$ ): Es el cociente entre la potencia que entrega la celda fotovoltaica y la potencia de la radiación solar que incide sobre ella.
- ❖ Voltaje en el punto máximo de potencia ( $V_{mpp}$ ): Es el máximo voltaje que producirá la celda fotovoltaica para unas condiciones determinadas de temperatura y radiación solar.
- ❖ Corriente en el punto máximo de potencia ( $I_{mpp}$ ): Es la máxima corriente que producirá la celda fotovoltaica para unas condiciones determinadas de temperatura y radiación solar.
- ❖ Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ): Es el máximo voltaje que producirá la celda fotovoltaica para una corriente igual a cero.
- ❖ Corriente de circuito abierto ( $I_{sc}$ ): Es la máxima corriente que producirá la celda fotovoltaica para un voltaje igual a cero.

Otra característica no menos importante de las celdas fotovoltaicas es su respuesta espectral, que permite determinar que en la zona del visible es donde se obtiene el mejor desempeño de las celdas. Esta respuesta espectral proporcionada por el fabricante se presenta en la Figura. 6.



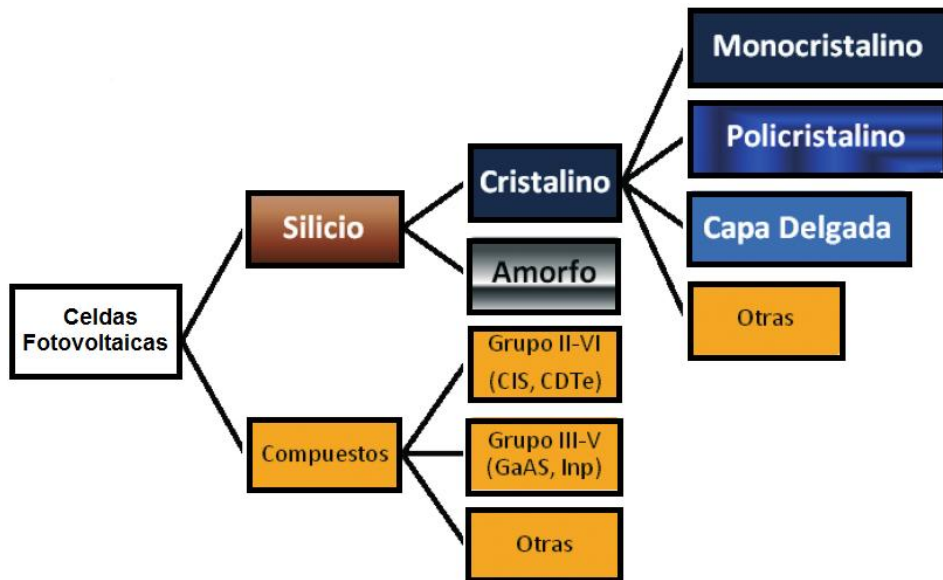
**Figura. 6. Respuesta espectral de la celda solar**[18]

## 2.1.4 TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico consta de varios componentes que incluyen paneles fotovoltaicos, conexiones eléctricas, soportes y sistemas para regular y controlar la generación de corriente.

Los paneles fotovoltaicos se clasifican según el tipo de celda fotovoltaica con que se fabriquen. Así mismo, las celdas se clasifican según el tipo de material semiconductor que las constituye y según su estructura interna[17].

Según su tecnología de fabricación los paneles fotovoltaicos pueden ser convencionales, especiales, semitransparentes, semiflexibles, tejas, capa delgada, entre otros.



**Figura. 7. Clasificación de celdas fotovoltaicas según tecnologías de fabricación**

Fuente: Autor

Las categorías de tecnologías fotovoltaicas de mayor disponibilidad en el mercado para las edificaciones son las celdas de silicio (monocristalinas y multicristalinas) y las celdas de capa delgada. Hoy en día, estas tecnologías representan el 85% del mercado[19].

**Silicio monocristalino:** Es el material más utilizado actualmente para la fabricación de celdas fotovoltaicas. Su inconveniente es el alto costo durante el proceso de fabricación, debido a su elevada pureza. Su mayor ventaja es la eficiencia, la cual es notablemente superior al resto de los tipos de celdas. Las celdas

monocristalinas pueden conseguir un rendimiento de aproximadamente un 22% en laboratorio y un 16% en condiciones reales de funcionamiento y su superficie posee un color uniforme en toda la celda[17].

**Silicio policristalino:** Las celdas policristalinas proceden del corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar en un crisol. Él cual está formado por pequeños cristales de silicio. Este tipo de fabricación es menos costosa que la del silicio monocristalino, por lo que las celdas tienen un costo más bajo que las anteriores. Su rendimiento es de aproximadamente 18% en laboratorio y 12% en condiciones reales de funcionamiento. La superficie de las celdas policristalinas se diferencia de la monocristalinas en que tiene zonas de colores diferentes.

**Capa Delgada:** Un caso particular de las celdas de silicio cristalino, “es la tecnología conocida como “capa delgada” la cual está desarrollándose por algunos fabricantes, con un futuro prometedor. El funcionamiento eléctrico es el mismo que el del silicio mono y policristalino, pero la elaboración es completamente diferente”[17].

En este estudio se implementan paneles fotovoltaicos monocristalinos que incorporan ciertas características de capa delgada, la más relevante de ellas para el interés de este estudio, radica en su menor peso en comparación con los paneles fotovoltaicos monocristalinos convencionales. En la Tabla 2 se presentan las principales características que proporciona el fabricante, para los paneles fotovoltaicos utilizados en la investigación[18].

**Tabla 2. Características de los paneles fotovoltaicos implementados**

<b>Modelo No.</b>	FLD-SF--M120W
Potencia máxima	120 W
Voltaje de funcionamiento óptima (vmp)	18 V
Corriente de funcionamiento óptima (imp)	6.66A
Tensión de circuito abierto (voc)	22 V
Corriente de cortocircuito (isc)	7.06a
Eficiencia de la célula	17-18%
Cantidad de la célula solar	4x9
Módulo Temperatura de funcionamiento	-40 ° C a + 85 °
Tamaño	1350x550mm
Peso	3.5 kg

El menor peso de los paneles fotovoltaicos proporciona un menor consumo de potencia al sistema de seguimiento solar. Lo que beneficia directamente el sistema de generación de energía limpia.

## **2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA**

Actualmente, existen dos formas de utilizar la energía eléctrica generada a partir de paneles fotovoltaicos[20], en primer lugar encontramos instalaciones aisladas de la red eléctrica o Zonas No Interconectadas (ZNI), los cuales almacenan la energía generada en baterías para poder disponer de su uso cuando sea necesario.

En segundo lugar, se encuentran las instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional (On Grid), en la cual la energía generada se envía directamente a la red eléctrica para su distribución donde sea demandada.

En este estudio se explora el desempeño de los sistemas On Grid, con la ventaja del no uso de sistemas de almacenamiento (baterías), los cuales se presenta a continuación de forma detallada.

### **2.2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA**

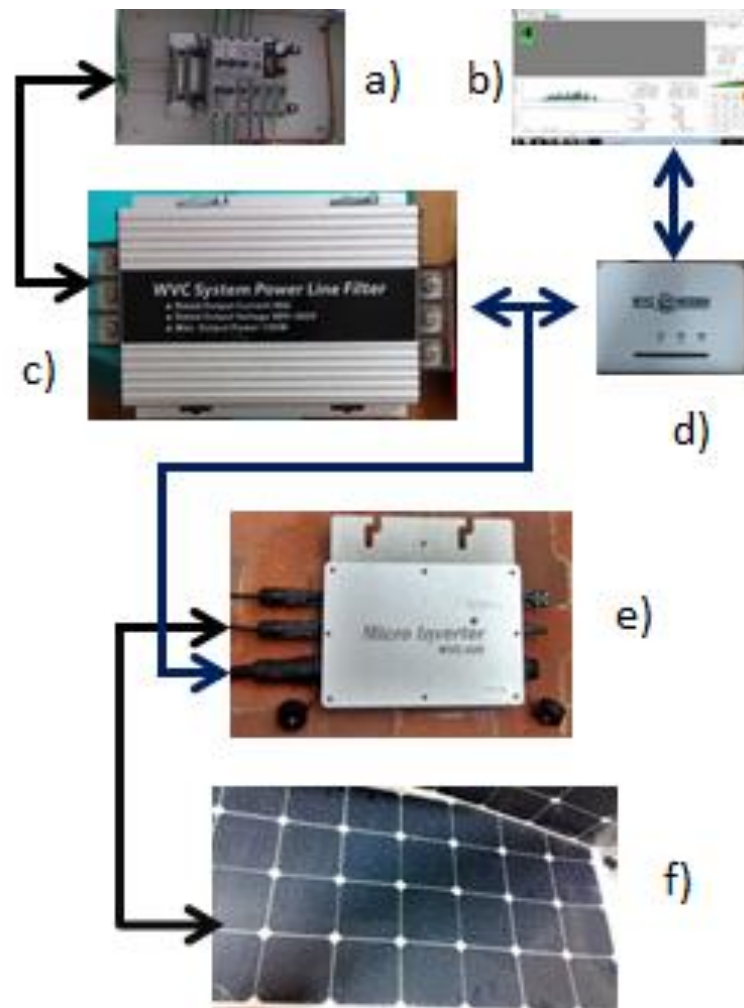
Para poder instalar los sistemas On Grid, se debe contar con una red conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN), estos sistemas fotovoltaicos contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmosfera.

El consumo de electricidad es independiente de la energía generada por el sistema de paneles fotovoltaicos. El usuario consume la energía generada por el sistema On Grid y si no es suficiente, obtiene energía de la red convencional para satisfacer las demandas del consumo. Por ende, el tamaño de la instalación es independiente del consumo de electricidad de la institución. Para dimensionar la instalación se debe tener en cuenta la inversión inicial, el espacio disponible y el costo-beneficio que se desea obtener con el sistema de generación.

### **2.2.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA INSTALACIÓN**

En la Figura. 8 , se presenta el sistema fotovoltaico On Grid implementado y acoplado a la estructura de seguimiento solar.





**Figura. 8. Sistema Fotovoltaico On Grid con monitoreo**

Fuente: Autor

Los elementos que componen la instalación son:

- a) Caja de conexión a la red eléctrica y protecciones.

Es una caja que aloja en su interior los elementos protectores de cada una de las líneas generales de alimentación de una instalación eléctrica, además de realizar físicamente la conexión, evita que daños internos se extiendan a la red de distribución. (Ver Figura. 9)

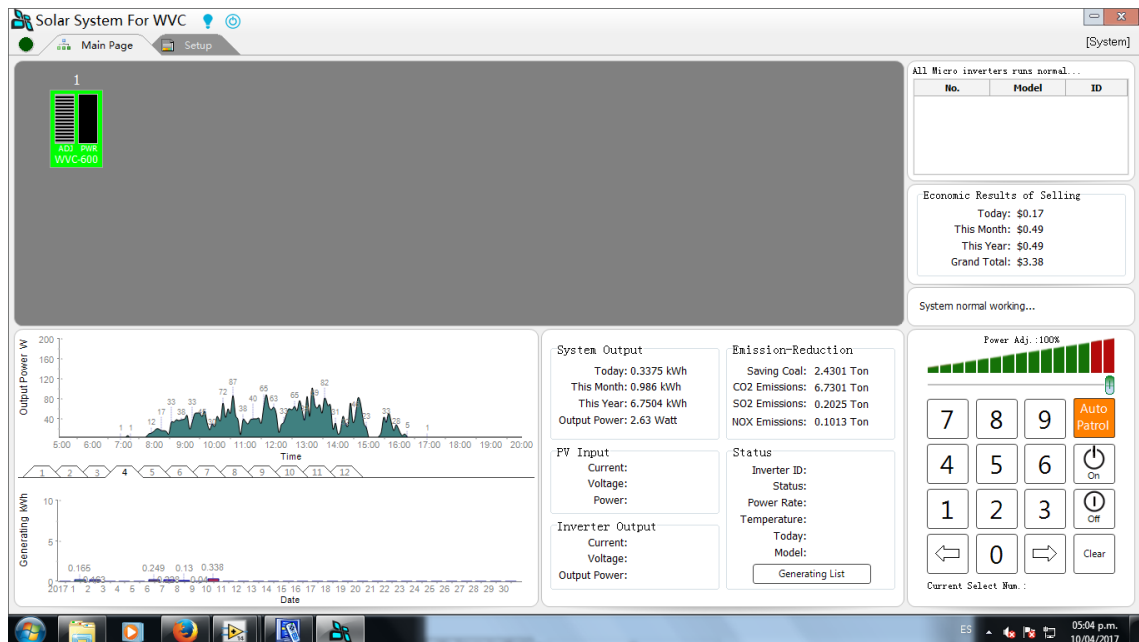


**Figura. 9. Caja de conexión a la red eléctrica y protecciones**

Fuente: Autor

b) Software KDM Sistema de Monitoreo de Energía Solar 3.0

El sistema de monitoreo inteligente permite tener datos en tiempo real y controlar el arranque/ parada/regular la energía del inversor. (Ver Figura. 10)



**Figura. 10. KDM Solar Energy Monitoring System 3.0**

Fuente: Autor

c) WVC Filtro de Sistema de Potencia

Es un dispositivo de aislamiento de la señal, evita la interferencia de la red eléctrica a la red de los paneles. (Ver Figura. 11)



**Figura. 11. WVC System Power Line Filter**

Fuente: Autor

d) WVC Modem

WVC Módem es el componente importante de comunicación con el sistema de generación de energía. El WVC Módem puede monitorear y administrar hasta 100 unidades de micro inversores. Es recomendable instalar en el mismo circuito de fase, entre el inversor y el Módem, el filtro WVC para evitar interferencias en la comunicación entre los diferentes componentes.

El WVC Módem estándar, viene con interfaz RS232, si no se cuenta con el puerto RS232 en el equipo, es necesario comprar el conector USB A RS232, para utilizar el puerto USB para comunicarse directamente[18]. (Ver Figura. 12)



**Figura. 12. WVC Modem**

Fuente: Autor

#### e) WVC 600 Micro Inversor

El Micro inversor WVC-600 para interconexión (On Grid) de onda pura, es una tecnología innovadora, complementada por el sistema de filtro protector y el sistema de monitoreo, lo que brinda una gran confiabilidad y reduce enormemente el problema que se tiene con antiguos micro inversores. Cuenta con un grado de protección IP65, su diseño lo protege de manera eficaz del agua de lluvia y de la erosión causada por la intemperie, está diseñado con función MPPT, (Maximum Power Point Tracking) Punto Máximo de Rendimiento de Energía, capaz de seguir cambios en la radiación solar y controlar la de potencia de salida, con eficacia, captura y recoge la luz del sol. Usa la transmisión de energía eléctrica de Corriente Alterna, con tecnología inversa de transmisión, la cual es una tecnología patentada. La salida de potencia del inversor provee carga de uso prioritario, proporcionando electricidad extra a la red, la eficiencia del inversor en la producción emitida da una transmisión de electricidad por encima del 99% por ciento[21]. (Ver Figura. 13)



Figura. 13. Micro Inversor WVC-600

Fuente: Autor

El sistema de generación On Grid permite ampliaciones por módulos, se deben tener en cuenta los parámetros de funcionamiento de los micro inversores para realizar futuras ampliaciones como se aprecia en la Figura. 14.

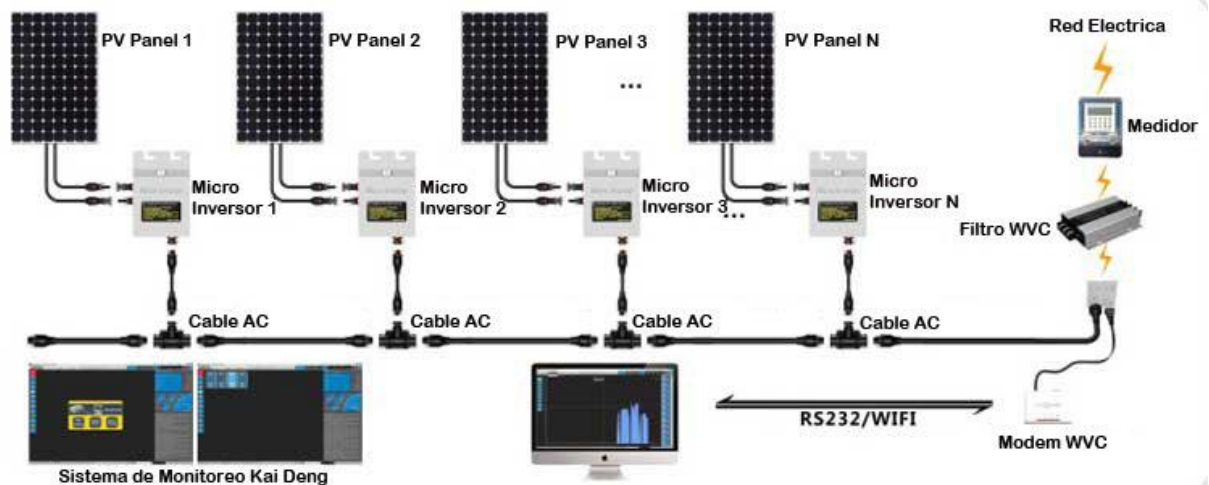


Figura. 14. Esquema de hasta 100 Micro inversores conectados a un modem[18]

Las características del Micro Inversor WVC-600 obtenidas del fabricante se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3. Parámetros WVC-600**

<b>Información de Entrada</b>		<b>KD-WVC600-120VAC/230VAC</b>	
Potencia recomendada de Entrada	500-600Watt		
Paneles FV Recomendados (máximo)	600W/Vmp>34V/Voc<50V		
Entrada Máxima en DC	50V		
Potencia Pico de tracking	25-40V		
Rango de Voltaje de Operación	17-50V		
Min / Max voltaje de inicio	22-50V		
Corriente Máxima de Corto Circuito DC	40A		
Corriente Máxima de Entrada	25A		
<b>Salida</b>	<b>@120VAC</b>	<b>@230VAC</b>	
Potencia de salida Pico	600Watt	600Watt	
Potencia promedio de Salida	550Watt	550Watt	
Corriente promedio de Salida	4.58A	2.3A	
Rango de Voltaje	80-160VAC	180-260VAC	
Rango de frecuencia	57-62.5Hz	47-52.5Hz	
Factor de Potencia	>96%	>96%	
Inversores por Banco Maximo	6PCS(Single-phase)	12PCS(Single-phase)	

<b>Eficiencia de Salida</b>	<b>@120VAC</b>	<b>@230VAC</b>
Eficiencia Estática MPPT	99.5%	99.5%
Eficiencia Máxima de Salida	92.3%	94.6%
Promedio de eficiencia	91.2%	93.1%
Consumo nocturno de potencia	<50mW Max	<70mW Max
THD	<5%	<5%
<b>Exterior</b>		
Temperatura Ambiente	-40 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ to +60 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Rango de Temperatura de Operación	-40 $\text{ }^{\circ}\text{C}$ to +82 $\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Dimensiones (WxHxD)	289mmx200mmx38mm	
Peso	1.53kg	
Grado de Protección	IP65	
Enfriamiento	Self-cooling	
<b>Características</b>		
Comunicación	Power Line	
Transmisión de Potencia	Reverse transfer, load priority	
Sistema de Monitoreo	Tiempo Real	
Compatibilidad Electromagnética	EN50081.part1 EN50082.part1	
Disturbio de Red	EN61000-3-2 Safety EN62109	
Detección de Red	DIN VDE 1026 UL1741	
Certificaciones	CEC,CE National patent technology	

#### f) Paneles Semiflexibles Monocristalinos

Transforman la energía del sol en energía eléctrica, tienen la capacidad de deflectarse  $30^\circ$  como se aprecia en la Figura. 15



**Figura. 15. Paneles fotovoltaicos monocristalinos Semi-flexibles**[18].

### 2.3 SEGUIDORES SOLARES

En el presente estudio se analiza la posibilidad de ampliar el sistema fotovoltaico institucional, a un sistema que permita auto generar un porcentaje de la energía que se consume en la institución. En este estudio se tiene en cuenta la posible alternativa de incorporar un sistema de seguimiento en el generador solar fotovoltaico On Grid a gran escala, dado el carácter innovador (se encuentra actualmente muy poco desarrollado en cubiertas). Por este motivo se estudian los tipos de seguidores solares existentes en la actualidad y se analizan las ventajas e inconvenientes de los mismos. Así como el incremento de producción energética que se espera obtener al incorporar este sistema.

Como se describió anteriormente, la selección de la tecnología de construcción de los paneles fotovoltaicos se realizó teniendo en cuenta las características de peso, eficiencia y flexibilidad de los paneles, características apropiadas para la futura instalación a gran escala. La flexibilidad de  $30^\circ$ , les permiten adaptarse fácilmente a la cubierta de la cancha de la institución mostrada en la Figura. 16, la cual posee una forma curva con orientación norte-sur, lo que la hace apta para un sistema de



seguimiento solar a gran escala. El poco peso de los paneles proporciona un menor consumo energético en el sistema de control.



**Figura. 16. Vista en Google Maps de la cubierta de la institución para ampliación del proyecto**

Fuente: Autor

La finalidad de un seguidor solar es la de incrementar la irradiación solar que reciben los paneles fotovoltaicos, procurando siempre que este se encuentre lo más perpendicular posible a la radiación directa del sol, empleando sistemas electromecánicos y electrónicos, para obtener así un incremento en la energía producida.

Existen diferentes criterios de clasificación según el número de ejes y el sistema de control de seguidores solares:

### **2.3.1 SEGUIDORES DE UN EJE**

Son seguidores que solo tienen un grado de libertad en su movimiento. Este tipo de seguidores se caracteriza por ser estructuras relativamente sencillas, por lo que el costo de implementación no es muy alto. Lo que lo hace especialmente atractivo para su empleo en cubiertas. “La rapidez de montaje es superior a la de una estructura fija, con la ventaja añadida de que puede incrementar hasta en un 30% la producción de energía respecto a ésta, en función de la latitud de la instalación,

gracias al seguimiento horizontal"[22]. Característica que lo hace especialmente atractivo para nuestra investigación. Su eje horizontal se ubica en dirección norte-sur. (Ver Figura. 17 )



**Figura. 17. Seguidor solar de un eje**

Fuente: Autor

Otro tipo de seguidores de un eje, son aquellos que varían el ángulo de acimut de los paneles solares. Los cuales constan de un eje vertical sobre el que se monta la estructura de seguimiento. Ejecuta un movimiento de  $180^\circ$  desde la dirección este hasta la oeste, durante el día. Este tipo de seguidores no se monta sobre cubiertas ya que es sumamente pesado (se diseña para montar sobre el eje un gran número de paneles solares) y presenta problemas estructurales sobre todo de cara al viento. En los últimos años compañías como STi Norland lo ha extraído de su portal de productos, concentrado su potencial en el seguidor de eje horizontal.[23] (Ver Figura. 18 )



**Figura. 18. Seguidor Solar de un eje acimutal[24]**

### **2.3.2 SEGUIDOR DE DOS EJES**

Son seguidores que combinan los movimientos de los ejes definidos anteriormente (Ver Figura. 19). El uso de este tipo de seguidores está limitado a huertos solares ya que requieren de una gran estructura y cimentación, por lo que no se usa en cubiertas. De acuerdo con (Turrillas & Aginaga, 2014) en su estudio realizado para la ciudad de Quito, donde la posición geográfica (latitud=0 13'07"N; -78 30'35"E; altitud=0 m) está cercana a la Colombiana, este tipo de seguidores presenta solo un 4% de incremento con respecto a seguidores solares de un solo eje[22].

El principal inconveniente de este tipo de seguidores es su alto costo de implementación, ya que han de ser sistemas robustos diseñados para soportar grandes cargas de viento, nieve, granizo e incluso soportar los fenómenos de corrosión. Por tal razón, se justifica su uso cuando el incremento de producción energética en relación con los costos de inversión, proporcionan un alto margen de beneficios que un sistema sin seguimiento solar.



**Figura. 19. Movimientos de un seguidor solar de dos ejes.[24]**

### **2.3.3 SEGUIDOR POR PUNTO LUMINOSO**

Este tipo de seguidores poseen un sensor que identifica cual es el punto más luminoso del cielo y hacia allí dirigen perpendicularmente el sistema de paneles. El principal inconveniente que presentan es la cuestionada fiabilidad, debido al deterioro o ensuciamiento del sensor en condiciones de trabajo reales (con respecto a las de laboratorio), lo cual provoca que el sistema de seguimiento no sea correcto e incluso empeore la irradiación captada con respecto a un sistema fijo.

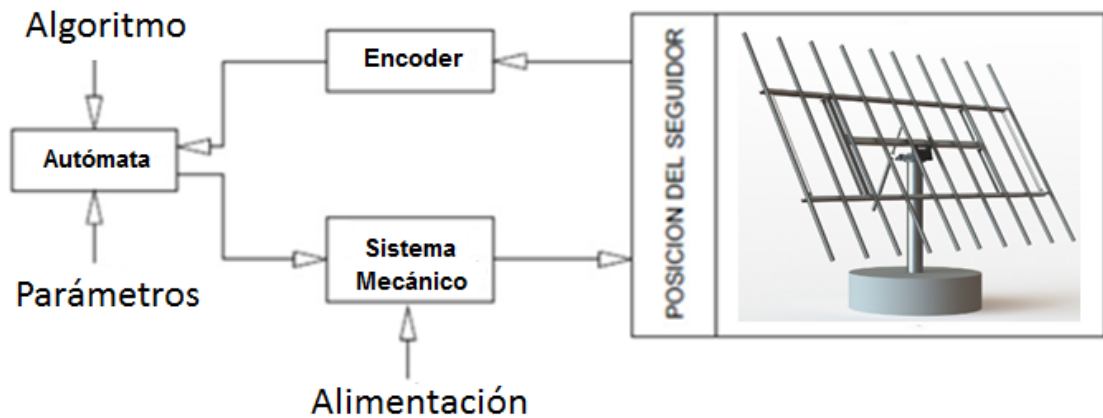
### **2.3.4 SEGUIDOR CON PROGRAMACIÓN ASTRONÓMICA**

Se trata de seguidores donde el mando proviene de un microprocesador que mediante tablas memorizadas identifica en todo momento la posición del sol y dirigen el sistema de paneles fotovoltaicos perpendicularmente hacia él. Estos sistemas presentan como principal ventaja, que no dependen de la nubosidad, reflejos de luz, lo que les da cierta fiabilidad una vez programado e implementado el algoritmo de seguimiento por cartas solares. Por el contrario el principal inconveniente que presentan precisamente es la dificultad para

implementar el algoritmo de seguimiento, aunque en la actualidad esta fase se encuentra bastante desarrollada.

### 2.3.5 FUNCIONAMIENTO DE UN SEGUIDOR SOLAR

El funcionamiento de un seguidor solar obedece a las trayectorias solares bien por medio de un mecanismo por programación astronómica o por punto luminoso. Su movimiento es dirigido por un autómata programable, que a través de ciertos parámetros definidos y mediante el algoritmo que se le ha introducido, envía las correspondientes señales a un sistema electromecánico, que es el encargado de posicionar el seguidor en el punto óptimo para que los paneles fotovoltaicos capturen la mayor cantidad de irradiación solar posible. El sistema es realimentado a través de un encoder, el cual mediante sensores de posición del seguidor envía las señales al autómata, corrigiendo los posibles errores de posicionamiento. (Ver Figura. 20)



**Figura. 20. Esquema de funcionamiento del seguidor solar**

Fuente: Autor

## 2.4 TÉRMINOS BÁSICOS

**Autogeneración:** Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de la actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin[3].

**Ahorro de energía:** Procesos, medidas o acciones cuyo propósito es que parte de la energía disponible no se destine a su consumo inmediato, para que pueda ser utilizada con posterioridad.

**Biomasa:** Energía contenida en la materia orgánica (hojas, cáscaras, residuos de alimentos) que permite la generación de biocombustibles como el biodiesel o el biogás.

**Conciencia energética:** Interiorización de valores tales como: la responsabilidad, la solidaridad, la identidad nacional, la honestidad, y la disciplina social, que entre otros elementos, conforman la educación político-ideológica y ciudadanía que se debe conseguir en las nuevas generaciones.

**Combustibles fósiles:** Carbón, petróleo y gas natural. Son combustibles de origen orgánico producidos a partir de restos de seres vivos de épocas geológicas anteriores. Son recursos no renovables y constituyen la mayor parte de las fuentes de energía que se consumen en la actualidad.

**Contador bidireccional:** Contador que acumula la diferencia entre los pulsos recibidos por sus entradas de cuenta ascendente y cuenta descendente[3].

**Desarrollo sostenible:** Aquel desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y el bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustentan, ni deteriorar el ambiente o el

derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, por lo menos en las mismas condiciones de las actuales[3].

**Eficiencia Energética:** Es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos. Este concepto generalmente se asocia a cambios tecnológicos, aun cuando la gran mayoría de las veces se logra gracias a una mejor organización del consumo, gestión de la energía y cambios de comportamiento (factores no técnicos). En términos simples, la eficiencia energética no es dejar de usar la energía si no aprender a usarla mejor.

**Energía:** Se define comúnmente como la capacidad de producir trabajo. Desde la física, es el producto de una fuerza actuando a lo largo de una distancia, o en otras palabras, es la posibilidad de mover un objeto (ejerciendo una fuerza) a lo largo de una distancia.

**Energía alternativa:** Es la que se aprovecha directamente de recursos considerados inagotables como el sol, el viento, los cuerpos de agua, la vegetación o el calor interior de la tierra.

**Energía eléctrica:** Es la energía generada por el movimiento de partículas muy pequeñas que producen cargas eléctricas.

**Energía eólica: Energía cinética del viento.** Es la energía producida por el movimiento del viento o de las masas de aire.

**Energía geotérmica:** Energía térmica acumulada al interior de la Tierra (géiseres o fuentes termales).

**Energía hidráulica: Energía potencial gravitatoria de una masa de agua.** Es la energía generada por el desplazamiento debido a las diferencias de altura (naturales o artificiales). Esta energía se utiliza para producir energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas.

**Energía mecánica:** Es la energía asociada al movimiento de la materia. Hay dos tipos de energía mecánica: (a) la energía cinética: la poseen todos los cuerpos en movimiento (persona caminando, piedra que cae, etc.) y (b) la energía potencial: está asociada a la posición o cambios de posición de los cuerpos (resorte comprimido, manzana sobre una mesa, etc.).

**Energía química:** Es la energía contenida en las sustancias químicas como alimentos y combustibles.

**Energía solar:** Es la energía proveniente del sol donde ocurren reacciones nucleares en su interior.

**Energía sonora:** Es la energía producida por la vibración de un objeto. Se propaga como onda a través del aire produciendo un sonido.

**Energía térmica:** Es la energía producida por el movimiento continuo y desordenado de las partículas que forman la materia. Se libera al entorno en forma de calor.

**Excedente de energía:** La energía sobrante una vez cubiertas las necesidades de consumo propias, producto de una actividad de autogeneración[3].

**Fuentes no renovables de energía: Fuentes Convencionales de Energía.** Son aquellas que existen en cantidades limitadas en la Tierra y tardan millones de años en regenerarse. Aquí se encuentran los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, y los combustibles nucleares que provienen de minerales como el uranio.

**Fuentes renovables de energía: Fuente no Convencionales de Energía (FNCE).** Son aquellas que se pueden regenerar y se basan en los ciclos naturales del planeta. Las más comunes son la hidráulica, solar, eólica, biomasa y geotérmica.



**Gestión eficiente de la energía:** Conjunto de acciones orientadas a asegurar el suministro energético a través de la implementación de medidas de eficiencia energética y respuesta de la demanda[3].

**Radiación electromagnética solar:** Es una forma ondulatoria de energía que viaja a través del espacio a la velocidad de la luz. De acuerdo a la longitud de onda, comprende desde el infrarrojo (ondas más largas) hasta el ultravioleta (ondas más cortas). Este tipo de radiación se origina al interior del sol, donde bajo condiciones de altas presiones y temperaturas, el hidrógeno se transforma en helio. En este proceso se genera una gran cantidad de calor.

**Revolución Industrial:** Período de rápido crecimiento industrial con amplias consecuencias sociales y económicas, que comenzó en Inglaterra durante la segunda mitad del siglo XVIII y se extendió por Europa y más tarde a otros países incluidos los Estados Unidos. La invención de la máquina de vapor impulsó en gran medida este desarrollo. La Revolución Industrial marca el principio de un fuerte aumento en el uso de combustibles fósiles y de las emisiones, sobre todo, de dióxido de carbono fósil.

**Sistema energético nacional:** Conjunto de fuentes energéticas, infraestructura, agentes productores, transportadores, distribuidores, comercializadores y consumidores que dan lugar a la explotación, transformación, transporte, distribución, comercialización y consumo de energía en sus diferentes formas, entendidas como energía eléctrica, combustibles líquidos, sólidos o gaseosos, u otra. Hacen parte del Sistema Energético Nacional, entre otros, el Sistema Interconectado Nacional, las Zonas No Interconectadas, las redes nacionales de transporte y distribución de hidrocarburos y gas natural, las refinerías, los yacimientos petroleros y las minas de carbón, por mencionar solo algunos de sus elementos[3].

**Sostenibilidad energética:** Equilibrio entre tres dimensiones principales: la seguridad energética, la equidad social y la mitigación del impacto ambiental.

**Zonas No Interconectadas (ZNI):** Se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN)[3].

## Capítulo III

### 3. DESARROLLO DEL SEGUIDOR SOLAR

Este capítulo presenta el desarrollo del sistema de seguimiento solar. Básicamente consiste en diseñar e implementar una estructura móvil de seguimiento solar controlada, que permita encontrar las diferencias entre sistemas de posicionamiento fijo y con seguimiento solar. Se espera que por medio del seguidor solar se pueda captar y generar la mayor cantidad de energía durante el día. La estructura implementada de dos ejes de movimiento consta de una parte mecánica y otra electrónica encargada de realizar el control de la estructura desde un acceso remoto al sistema.

#### 3.1 ESTRUCTURA MECÁNICA DE SEGUIMIENTO SOLAR

La estructura mecánica de seguimiento tiene una altura de 80 cm y ocupa un área de anclaje de  $900 \text{ cm}^2$ , posee dos ejes para el movimiento, los cuales ejecuta por medio de dos motores DC y sistemas mecánicos de piñones y tornillo sin fin para reducir la velocidad de los motores y aumentar la potencia mecánica del movimiento. Estos movimientos permiten variar los ángulos de altura solar ( $\beta$ ) y acimut solar ( $\phi$ ), descritos anteriormente para realizar un seguimiento del sol y captar la mayor cantidad de potencia generada durante el día. (Ver Figura. 21)



**Figura. 21. Estructura mecánica para seguimiento de altura y acimut solar**

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que “la corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones” cuando las superficies metálicas están humedecidas. Y que los contaminantes gaseosos y sólidos potencian el efecto corrosivo de los factores meteorológicos[25]. Se realiza un recubrimiento con un anticorrosivo de color azul para contrarrestar los efectos causados, por el NaCl y el SO<sub>2</sub> presentes en la atmósfera y el aire, sobre la estructura. (Ver Figura. 22)



**Figura. 22. Aplicación de anticorrosivo para disminuir efectos corrosivos atmosféricos.**

Fuente: Autor

Se construyó una estructura de 115 cm por 105 cm, para soportar los dos paneles fotovoltaicos, a la que también se le aplicó anticorrosivo para proteger el tubo de hierro de 1 pulgada con el cual se construyó. Su diseño se realizó con el fin de acoplar el Micro Inversor por detrás de los paneles y protegerlo un poco de la corrosión atmosférica. (Ver Figura. 23)



**Figura. 23. Estructura de soporte para los paneles fotovoltaicos.**

Fuente: Autor

Se realiza el acople de la estructura mecánica con la estructura de paneles fotovoltaicos. Se selecciona el lugar de instalación en la institución, teniendo en cuenta que es uno de los puntos más altos, con buen espacio de trabajo y no se presentan inconvenientes de pérdidas por sombras en la generación de energía. (Ver Figura. 24)



**Figura. 24. Acople de estructuras y ubicación del sistema de seguimiento.**

Fuente: Autor

De acuerdo con AccuWeather en el municipio de Floridablanca se presentan ráfagas de viento de hasta 17 Km/h. (Ver Tabla 4)

**Tabla 4. Reporte de condiciones atmosféricas en Floridablanca según AccuWeather**

<b>RealFeel®:</b> 29°	<b>Lluvia:</b> 0 mm
<b>Vientos:</b> 13 km/h NNO	<b>Nieve:</b> 0 cm
<b>Ráfagas:</b> 17 km/h	<b>Hielo:</b> 0 mm
<b>Humedad:</b> 70%	<b>Visibilidad:</b> 16 km
<b>Punto de rocío:</b> 19°	<b>Ceiling:</b> 9144 m
<b>Índice UV:</b> 8 (Muy alto)	<b>Wet Bulb:</b> 21°
<b>Nubosidad:</b> 79%	

Por esta razón, se ancla la estructura a la placa con tiros de pistola de impacto para como se muestra en la Figura. 25.



**Figura. 25. Anclaje de estructura con tiros de impacto**

Fuente: Autor

### **3.2 SENSOR DE PUNTO LUMINOSO**

Para el desarrollo del proceso de sensado se elaboró un sistema con celdas fotovoltaicas de las mismas características (ver Tabla 1) y fabricante de las de los paneles fotovoltaicos adquiridos. Con un arreglo de 4 celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino de la empresa Mars Rock Solar. A las que se les soldó los conectores con ayuda del Flux pen y cautín para mejorar su adhesión. (Ver Figura. 26)



**Figura. 26. Soldadura de conectores de celdas fotovoltaicas**

Fuente: Autor

Para la ubicación de las celdas fotovoltaicas se diseñó una estructura seleccionando el uso de materiales con características de buena resistencia a la intemperie según sus fabricantes:

#### Policarbonato[26]

- ❖ Resistencia a golpes extremadamente elevada
- ❖ Transparente
- ❖ Resistencia y rigidez elevadas
- ❖ Elevada dureza
- ❖ Elevada resistencia a la deformación térmica
- ❖ Elevada estabilidad dimensional (elevada resistencia a la fluencia)
- ❖ Buenas propiedades de aislamiento eléctrico
- ❖ Elevada resistencia a la intemperie
- ❖ Alta resistencia a rayos de gran energía

#### Resina Epoxi Transparente[27]

- ❖ Para aislamiento eléctrico
- ❖ impregnaciones al vacío
- ❖ laminaciones
- ❖ Para piezas de alta resistencia a la intemperie.
- ❖ Excelentes características mecánicas.
- ❖ Fuerte adhesión a casi todos los materiales.
- ❖ Baja contracción al curar (1-2%)
- ❖ Termoestabilidad.
- ❖ Elevada resistencia química.
- ❖ Resistencia a la abrasión.
- ❖ Buenas propiedades eléctricas.
- ❖ Absorción de agua reducida.

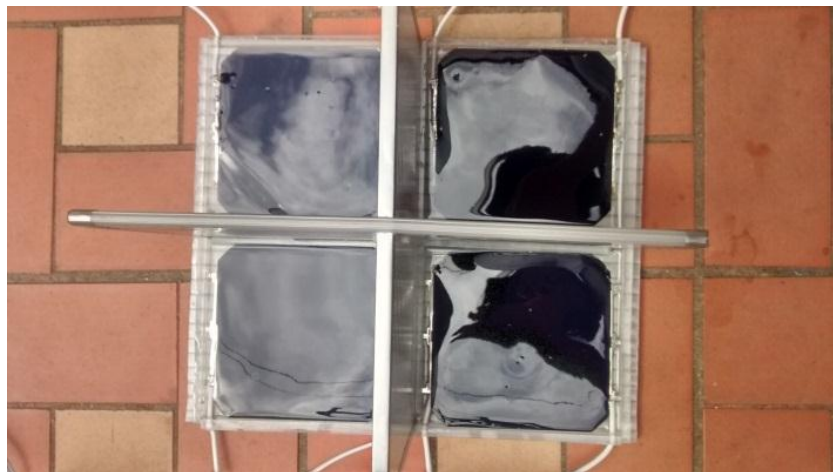




**Figura. 27. Uso de materiales para encapsulado del sensor.**

Fuente: Autor

Es por esto, que el policarbonato, se usó para servir de soporte a las celdas fotovoltaicas, por medio de tres laminas, una de ellas de 28 cm por 30 cm, y las otras dos para formar la cruz de 14 cm de alto por 28 cm de ancho, cada celda se ubicó en cada uno de los cuatro cuadrantes formados por la cruz, de tal forma que las sombras simulen las orientaciones en la dirección: norte, sur, este y oeste. El encapsulado de las celdas se realizó mezclando los dos componentes de resina epoxi transparente como se presenta en la Figura. 27, obteniéndose como resultado final el sensor construido al vacío como se presenta en la Figura. 28.

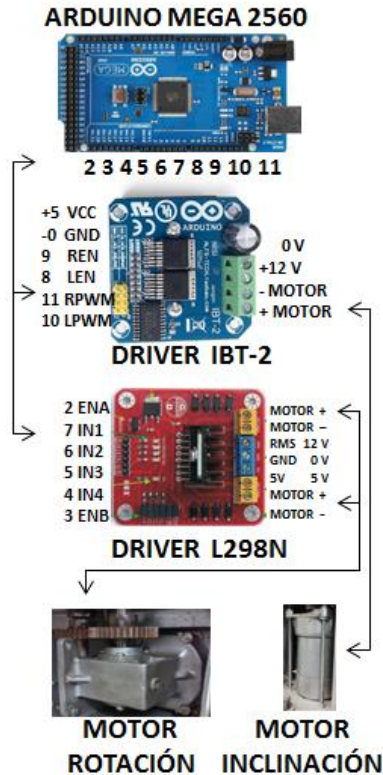


**Figura. 28. Sensor de irradiación solar**

Fuente: Autor

### 3.3 COMPONENTES ELECTRONICOS DE CONTROL

Se trabajó con la tarjeta Arduino Mega 2560 y los drivers compatibles Ibt-2 y L298n para establecer la conexión entre la interface de Labview y los motores DC encargados del movimiento de la estructura de dos ejes, movimientos de rotación y de inclinación, sus conexiones se presentan en la Figura. 29.



**Figura. 29.** Diagrama de Conexión del sistema embebido y los motores DC

Fuente: Autor

#### Arduino Mega 2560

Arduino es una plataforma de desarrollo de código abierto, posee entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales, y un entorno de programación que implementa el lenguaje Processing/Wiring. Esta tarjeta puede ser utilizada para desarrollar objetos autónomos interactivos o puede ser conectada por el puerto USB con el software de la computadora (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP). El IDE de código abierto puede ser descargado de forma gratuita para Mac OS X, Windows y Linux.

El Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 15 pueden ser usados como salidas de PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector para ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para usar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o energizarlo con una fuente de poder o batería para comenzar a usarlo. El Arduino Mega es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino[25]. (Ver Tabla 5)

**Tabla 5. Características AtMega 2560 según fabricante**

ATMEGA2560	Características
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5 V
Voltaje de entrada recomendado	7-12 V
Voltaje de entrada límite	6-20 V
Puertos de entrada y salida digital	54 (15 proporcionan PWM)
Puertos de entrada analógica	16
Corriente DC por Pin I/O	20mA
Corriente DC para el pin 3.3V	50mA
Memoria Flash	256KB (8KB para el bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz
Dimensiones	101.52 x 53.3 x mm
Color	Azul
Peso	37 g

### Driver IBT-2

Este driver usa dos Chips Infineon BTS7960 como puente H para permitir el control del motor, incorpora un protector ante sobrecalentamiento y sobrecorriente. Este dispositivo cuenta con un módulo aislador que permite separa el circuito de control de la parte de potencia para mantener la integridad del dispositivo, puesto que este driver puede llegar a generar una corriente de hasta 33A.

El Chip BTS7960 contiene dos transistores MOSFET de tipo P y N con un controlador IC integrado, lo cual permite la conexión de interfaz a un dispositivo externo de control, como lo puede ser un microcontrolador, ya que este cuenta con entrada de tipo lógico, ajuste de velocidad, generación de tiempo muerto y

protección contra exceso de temperatura, sobretensión, baja tensión, sobrecorriente y corto circuito[25]. (Ver Tabla 6)

**Tabla 6. Características Chip BTS7960 según fabricante**

Chip BTS7960	Características
Chip Buffer	Schmitt-trigger 74AHC244D
Voltaje de operación	5.5V~27V
Corriente de operación máxima	33A
Protección Sobrecorriente	Si
Baja corriente de reposo	7uA a 25°C
Entradas lógicas	Si
Tasa de respuesta ajustable	EMI
Señal PWM	Dos canales
Frecuencia de reloj	25KHz

El circuito embebido lbt-2, es un driver que soporta corrientes de hasta 33A, según especificaciones del fabricante, por esta razón, se usa para el motor de inclinación, ya que es el que mayor esfuerzo y consumo presenta. Durante su ejecución consume una corriente de 3A.

### **Driver L298n**

El driver L298N es un dispositivo que permite controlar el sentido de giro de los motores a una corriente de salida por cada canal de hasta 2A. Este módulo cuenta con un disipador de calor acorde a las características de este driver, sus características de diseño le permiten un rendimiento anti-interferencia, puede llegar a trabajar hasta con un nivel de tensión de entrada de 46V, aunque por cuestiones de seguridad es recomendable usar niveles de tensión por debajo de este valor. Puede llegar a controlar un motor paso a paso de dos fases y cuatro fases, dos motores de DC o uno solo de DC con consumo por encima de los 2A a través de los dos puertos en paralelo. De igual forma, incluye un regulador de voltaje 78M05 para obtener la energía de alimentación del dispositivo, sin embargo, cuando se superan los 12V, es recomendable usar una fuente de poder externa de 5V como fuente de alimentación digital y deshabilitar el jumper de 12V. Este dispositivo

tiene gran capacidad de filtrado de ruido, cuenta con un diodo de protección ante corriente inversa, haciendo que su funcionamiento sea más estable y fiable[25]. (Ver **Tabla 7**)

**Tabla 7. Características L298n según fabricante**

<b>L298/ Doble Puente H</b>	<b>Características</b>
Interfaz de potencia	7V~46V
Corriente máxima	4 A
Voltaje de control	5 V
Nivel de entrada de señal de control	Nivel alto $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$ Nivel bajo: $-0.3V \leq V_{in} \leq 1.5 V$
Corriente de control	36mA
Luces indicadoras	Encendido, control, dirección
Temperatura de operación	-40°C~+150°C

En el sistema de control se alimentó con 12V al igual que el driver lbt-2, para realizar el movimiento de rotación, durante el cual se consume una corriente de 2.1 A.

### **3.4 CONEXIONADO Y ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS**

El Ministerio de Minas y Energía a través de la “Resolución Número 18 0398 de 2004 de abril 7, expidió el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), que fija las condiciones técnicas que garantizan la seguridad en los procesos de Generación, Transmisión, Transformación, Distribución y Utilización de la energía eléctrica en la República de Colombia”[28].

Dado que la instalación eléctrica del generador solar se encuentra en la intemperie, para evitar fallos de aislamiento, se seguirán los criterios del RETIE y la NTC2050 para lugares húmedos.

Se selecciona para conducir la corriente de 12 Amperios generada conductores de cobre. El calibre mínimo para utilizar debe ser 14 AWG en cobre. “La Sección 310 de la NTC 2050 establece requisitos generales de los conductores y sus denominaciones de tipos, aislamiento, rótulos, etiquetas, resistencia mecánica, capacidad de corriente nominal y usos”[28].

**Tabla 8. Certificados de conformidad de cables eléctricos[28]**

PRODUCTOS	NORMATIVIDAD			CERTIFICADO DE CONFORMIDAD DE LOS PRODUCTOS CENTELSA	
	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)	Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050) Instalaciones	Norma Técnica Colombiana (NTC) Productos	Nacionales	Internacionales
Conductores para Instalaciones Interiores	Artículo 17	Artículo 310.13	1332	ICONTEC, CIDET	UL, LAPEM, ANCE
Baja Tensión	Artículo 17	-	1099	CIDET	UL, LAPEM, ANCE
Magneto	-	-	361	ICONTEC	UL, FONDONORMA
Control e Instrumentación	Artículo 17	Sección 340	3942, 2744	-	UL
Media Tensión	-	Sección 326	2186	CIDET	UL, CTL
Cobre Desnudo	Artículo 17	-	307	CIDET	LAPEM, ANCE
Aluminio Desnudo	Artículo 17	-	308, 309, 2619	CIDET	LAPEM, ANCE
Múltiplex	Artículo 17	Sección 321	2186, 4564	CIDET	UL
Acometidas	Artículo 17	Sección 338	4564	CIDET	UL

La tubería se seleccionó de acuerdo al anexo general del RETIE en 2013, se instalaron dos canales de tubería EMT de  $\frac{3}{4}$ , uno de ellos para la corriente y el otro para las señales de sensado y control. “Los tubos deben ser instalados con las roscas de acuerdo con la norma ANSI B1.201, NTC 332 u otras equivalentes y deben ser protegidas”[29]. (Ver Figura. 30)



**Figura. 30. Instalación eléctrica con tubos y cables según normas del RETIE**

Fuente: Autor

### **3.5 SISTEMA SUPERVISORIO EN LABVIEW**

Se desarrolló una interfaz gráfica en la plataforma de Labview 2012, la cual realiza la comunicación entre el sistema embebido de control y el sistema de paneles fotovoltaicos On Grid; así como la captura en tiempo real de la data tomada del monitoreo de la intensidades de luz y muestra el estado de los sensores que hacen posible el posicionamiento de la estructura.

El control del sistema implementado se realiza mediante una interface software desarrollada en Labview como se muestra en la Figura. 31. En el diagrama de bloques se establece una conexión con una cámara de video a través del puerto USB encargada de capturar y monitorear el sistema de paneles.

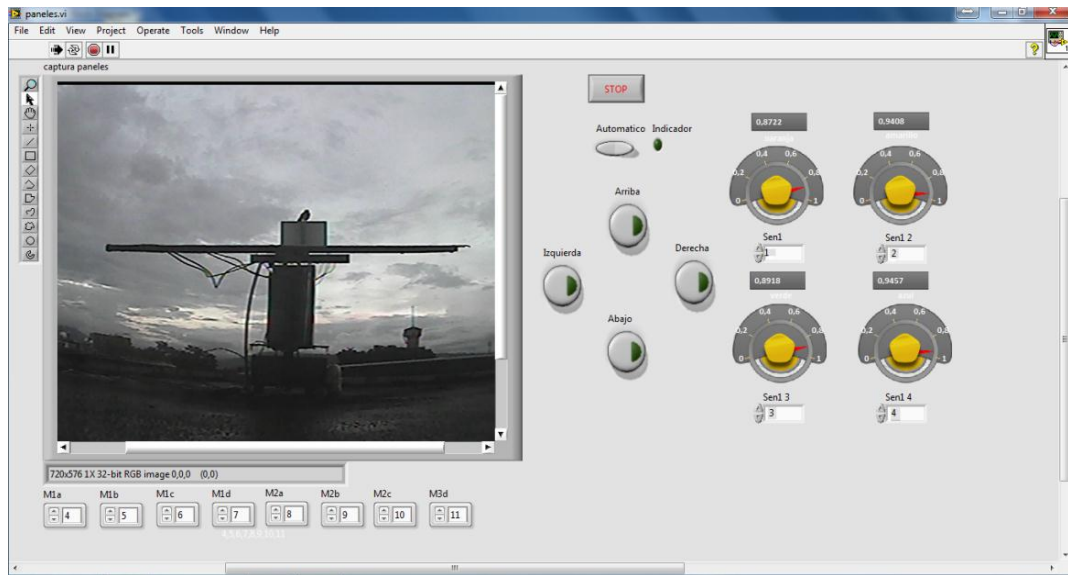


Figura. 31. Interface de control del sistema de seguimiento

Fuente: Autor

Se usó el toolkit LabVIEW Interface for Arduino v2.2.0.79 para realizar el enlace con el sistema embebido Arduino como se presenta en la Figura. 32.

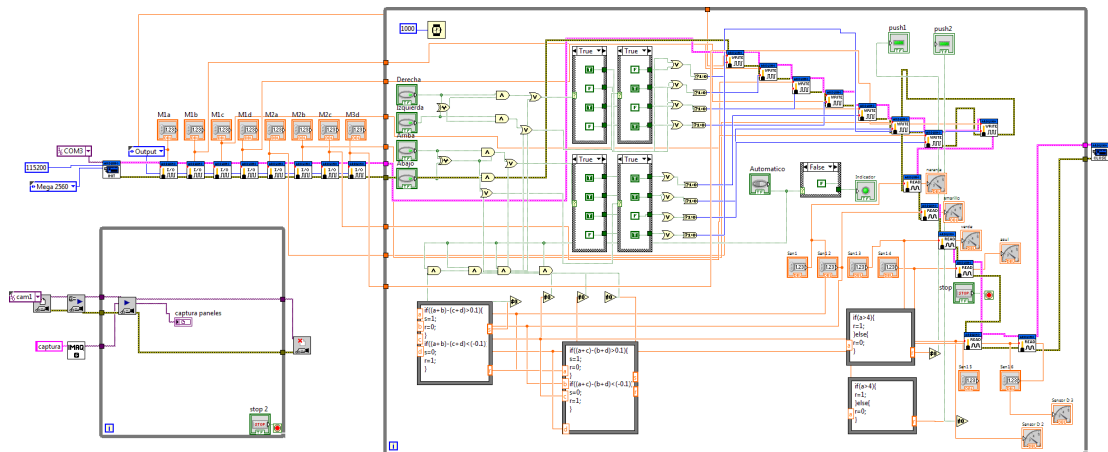


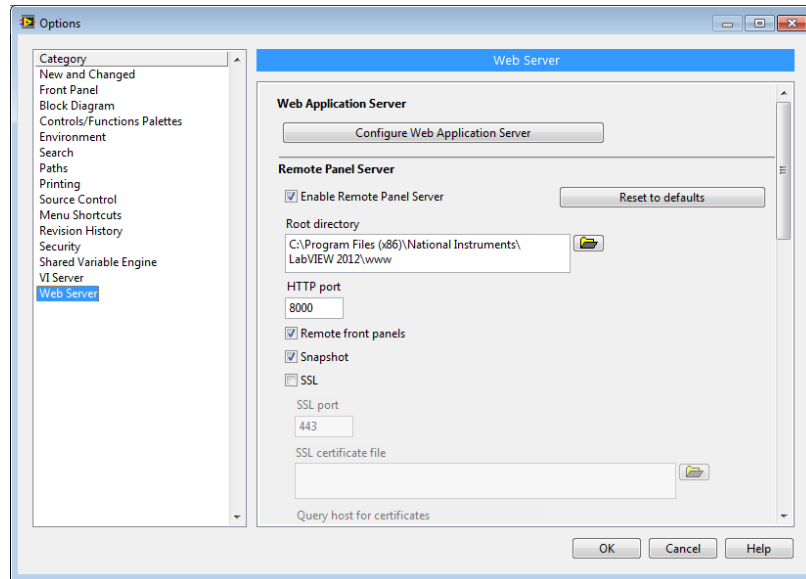
Figura. 32. Diagrama de bloques control en Labview

Fuente: Autor

La interfaz desarrollada en Labview 2012 (ver Figura. 31) tiene la opción de controlar la estructura de posicionamiento por acceso remoto con el protocolo TCP/IP configurando el servidor Web de Labview, desplegando un VIs por medio de una solicitud de un cliente. Para ello se configuró como un servicio Web a



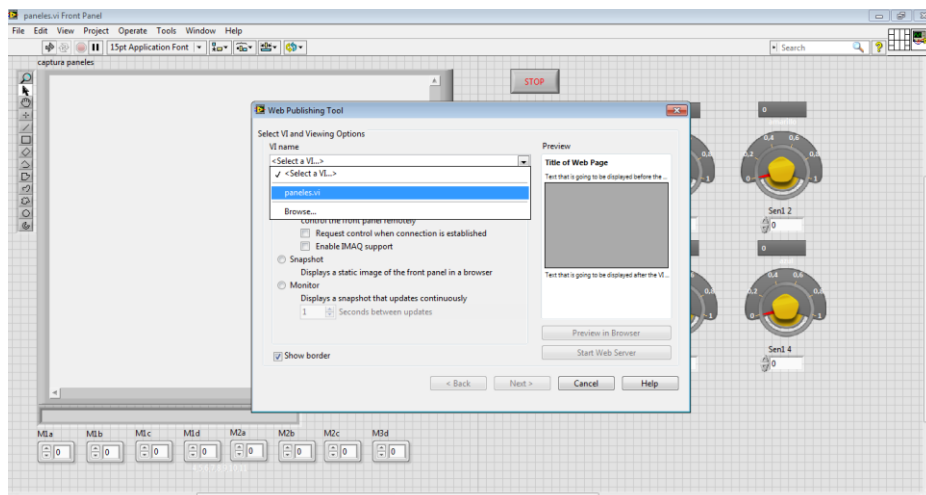
través de la opción Web Server, donde se debe habilitar la opción de Enable Remote Panel Server como se muestra en la Figura. 33.



**Figura. 33. Configuración de la opción Web Server en Labview**

Fuente: Autor

En la ventana Tools, opción Web Publishing Tool, se selecciona el Vi a controlar desde el acceso remoto; y el modo en que se desea realizar, puede ser en tiempo real, por fotos cada determinado tiempo o de solo observación por el usuario. (Ver Figura. 34)



**Figura. 34. Configuración Web Publishing Tool en Labview para acceso remoto**

Fuente: Autor

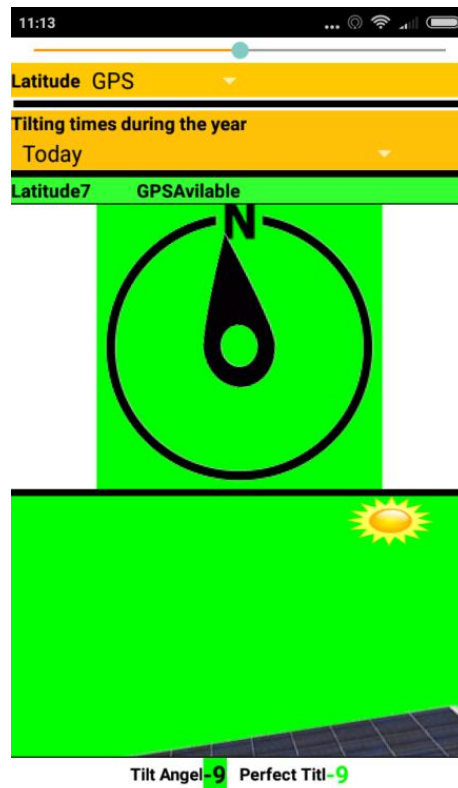
# Capítulo IV

## 4. RESULTADOS

Este capítulo contiene los resultados obtenidos del estudio de comparación de sistemas para la generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos On Grid, estáticos y con seguimiento solar; estos resultados se obtuvieron con la herramienta de monitoreo para sistemas fotovoltaicos KDM Solar Energy Monitoring System 3.0; cuyo manual de configuración se ha incluido como Anexo I.

### 4.1 SISTEMA ESTÁTICO

Hoy en día existen un sin número de aplicaciones móviles para el cálculo de posicionamiento de paneles fotovoltaicos estáticos. Estos programas parten de la ubicación geográfica del punto de instalación y de la época del año en que se obtienen los mejores ángulos de posicionamiento estático. Se realizó el estudio para conocer la mejor inclinación con diferentes herramientas, obteniéndose el mismo resultado con cada una de ellas. En la Figura. 35 se presenta el resultado obtenido en el mes de marzo con PV Solar Power System para la posición geográfica de Floridablanca.



**Figura. 35. Posicionamiento de paneles solares con aplicativo móvil PV Solar Power System en marzo de 2017**

Fuente: Autor

De la Figura. 35 se obtuvo que la mejor posición para los días del estudio era 9 grados con dirección norte. A continuación se presentan los resultados obtenidos durante 7 días continuos del mes de marzo con el sistema estático. (Ver Figura. 36)

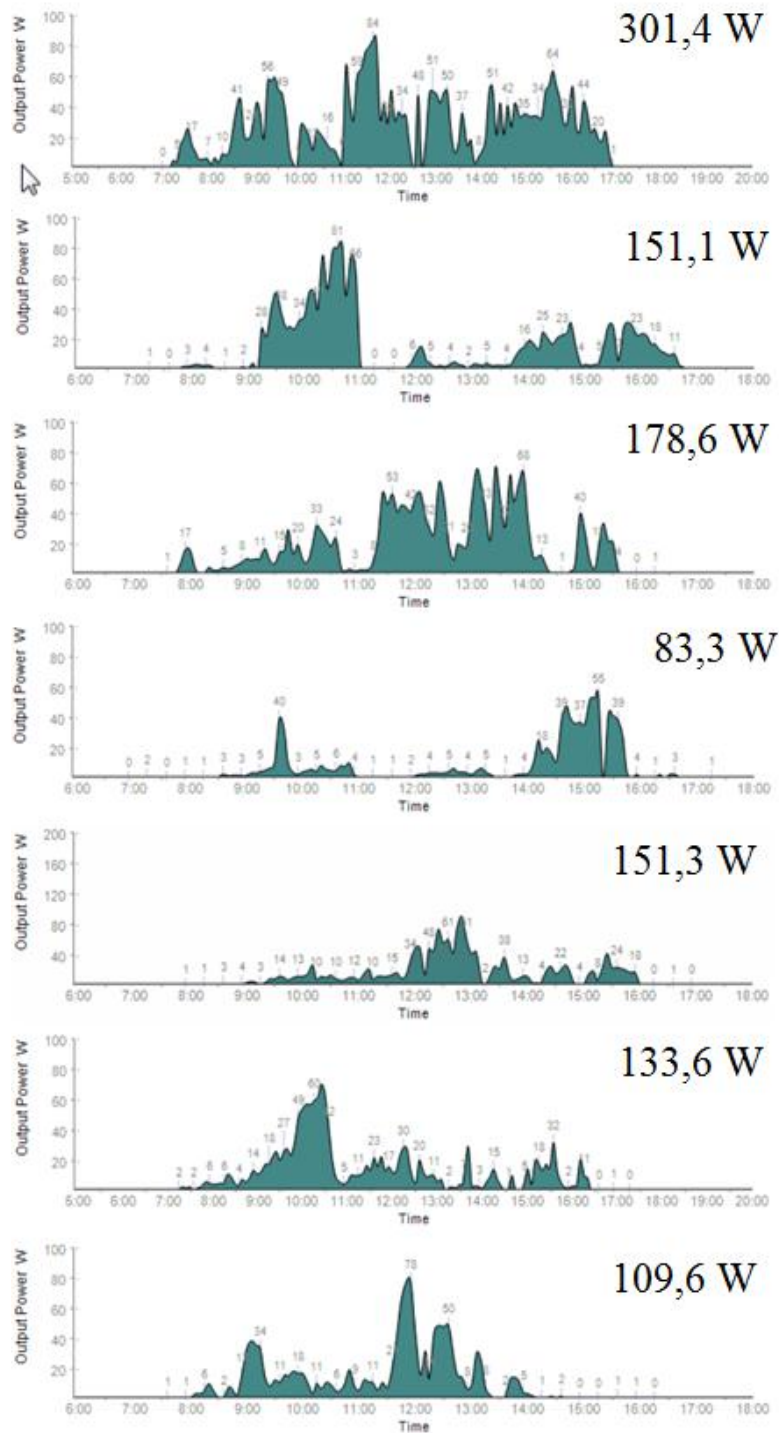
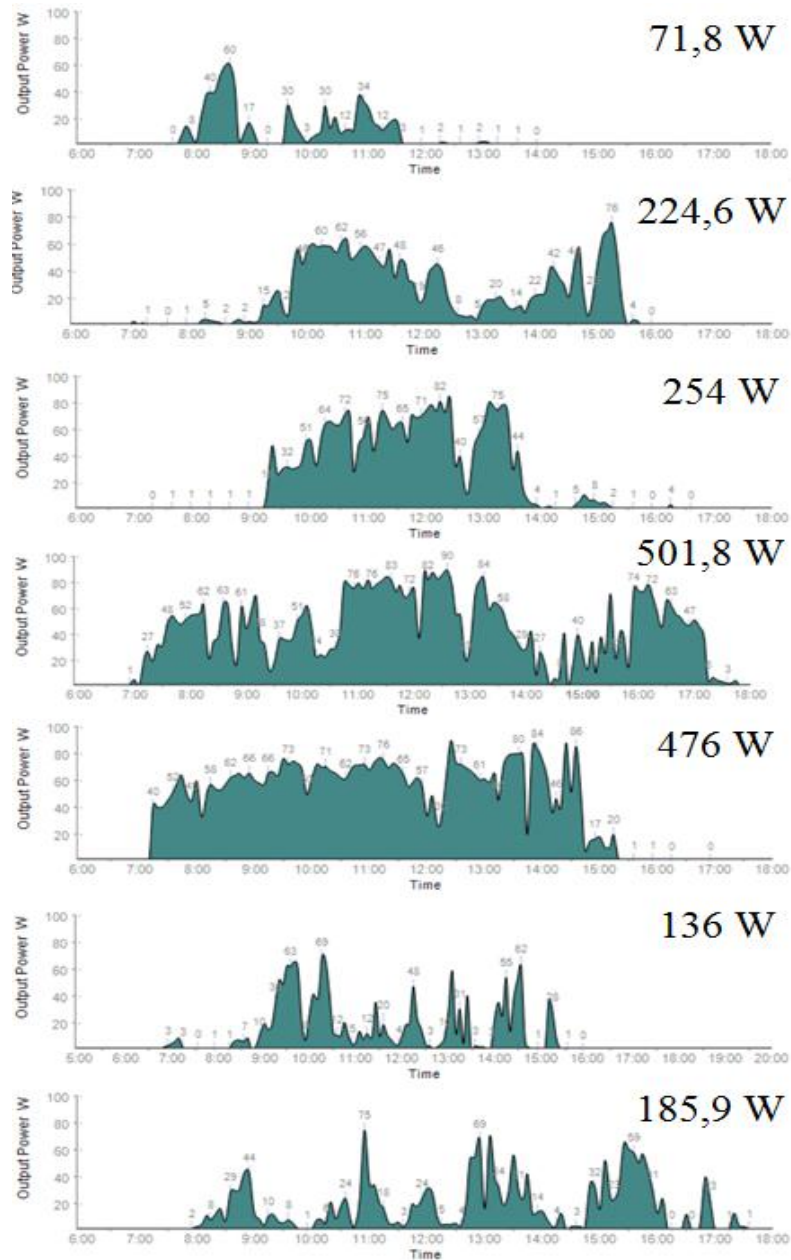


Figura. 36. Generación de potencia en 7 días continuos con sistema estático.

Fuente: Autor

## 4.2 SISTEMA CON SEGUIDOR SOLAR

Finalizada la etapa de monitoreo estático, se procedió a implementar el sistema fotovoltaico On grid con seguidor solar por punto luminoso, de donde se obtuvieron los resultados durante los siguientes 7 días continuos. (Ver Figura. 37 )



**Figura. 37. Generación de potencia en 7 días continuos con punto luminoso**

Fuente: Autor

### 4.3 CONSUMO DE POTENCIA SISTEMA DE CONTROL

Durante la ejecución de movimientos del sistema de seguimiento, el motor de inclinación consume una corriente de 3A con duración de 1 minuto que cubre todo el movimiento de altura solar por día. Este se alimenta con 12V al igual que el motor de movimiento acimutal, que en su movimiento de rotación consume una corriente de 2A, durante 15 segundos durante el día.

La Potencia Absorbida por un Motor de Corriente Continua es[30]:

$$P = V \cdot I, P_1 = V \cdot \frac{1}{1000}$$

donde:

P: Potencia en W.

V: Tensión de inducido en V.

I: Intensidad nominal en A.

P1: Potencia en kW

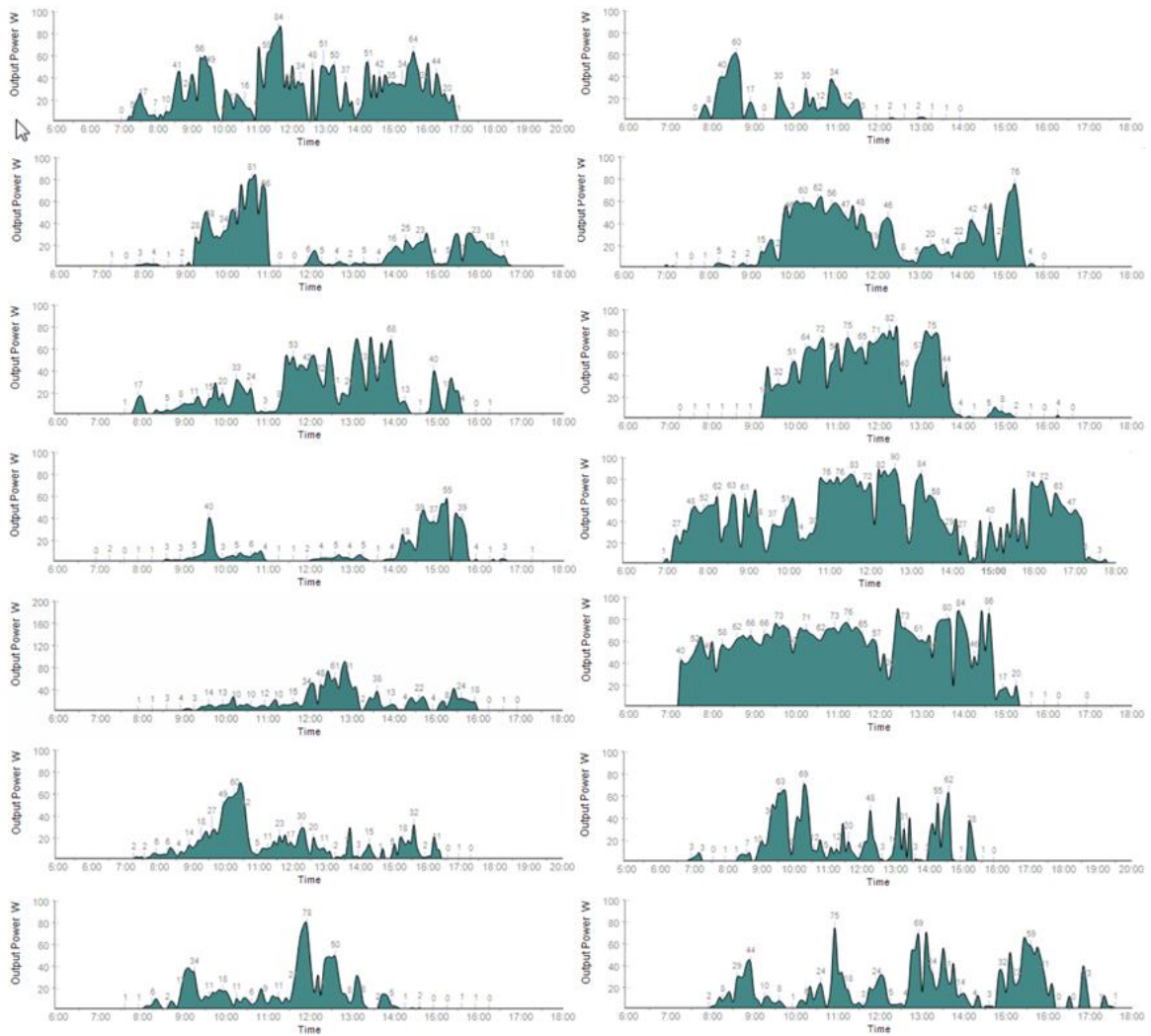
Las mediciones de consumo diarias de los elementos utilizados se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9. Consumo de potencia diario del sistema de control**

Elemento	Corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (h)	Potencia (Wh)
Arduino	0,1	5	24	12
Ibt-2	0,06	5	24	7,2
L298n	0,04	5	24	4,8
Motor I.	3	12	0,0166	0,5976
Motor R.	2	12	0,0055	0,132
TOTAL				24,7296

## 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS

Una vez expuestos los resultados obtenidos por el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0, se presenta a continuación el análisis de los resultados en forma comparativa entre los dos sistemas (Ver Figura. 38).



**Figura. 38. Gráfica comparativa de generación solar del mismo día en semanas diferentes y contiguas**

Fuente: Autor

Es apreciable el incremento en la producción de energía, en casi todos los días a excepción del primero, la generación fue siempre mayor. En la Tabla 10 se

presenta los resultados numéricos presentados en los diagramas gráficos de la Figura. 38

**Tabla 10. Registro de potencias generadas durante 14 días del mes de marzo.**

DIA	P(W) sistema estático	P(W) sistema seguidor
8	301,4	
9	151,1	
10	178,6	
11	83,3	
12	151,3	
13	133,6	
14	109,6	
15		71,8
16		224,6
17		254
18		501,8
19		476
20		136
21		185,9
	1109,9	1850,1

Para obtener el incremento entre un sistema con respecto al otro, se descuentan los 173,1 W del consumo de potencia por el sistema de seguidor. El cálculo de porcentaje de incremento se obtiene a partir de:

$$\%incremento = \frac{P_s - P_e}{P_e} \cdot 100$$

De esta forma obtuvimos que el sistema con seguimiento presenta un 51 % de aumento frente al sistema estático.

sin embargo, el seguidor de sensado por punto luminoso, es una opción que debe estar en constante mantenimiento, ya que la fauna y las



condiciones de humedad y sol, podrían causar distorsiones en el sistema de control a futuro. Por esta razón, el día 13 de abril de 2017 se realizó un registro de datos durante todo el día, con el fin de obtener curvas sobre el movimiento del sol en el municipio de Floridablanca. Las cuales se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Registro de ángulos de inclinación perpendicular a la irradiación directa de sol por la mañana**

<b>Hora</b>	<b><math>\theta</math> °</b>
8:10	60
8:40	50
9:10	37
9:40	34
10:00	33
10:40	30
11:10	19
11:30	16
11:40	11
11:45	6
12:00	3

A partir de los datos obtenidos del ángulo perpendicular a la irradiación solar directa de los paneles en dirección este, se realizaron diferentes ajustes por medio de la herramienta excel de Office, del procedimiento se obtiene que es una correlación lineal, teniendo en cuenta que una línea es la mejor curva posible, con un factor de correlación de 0,9787. (Ver Figura. 39)

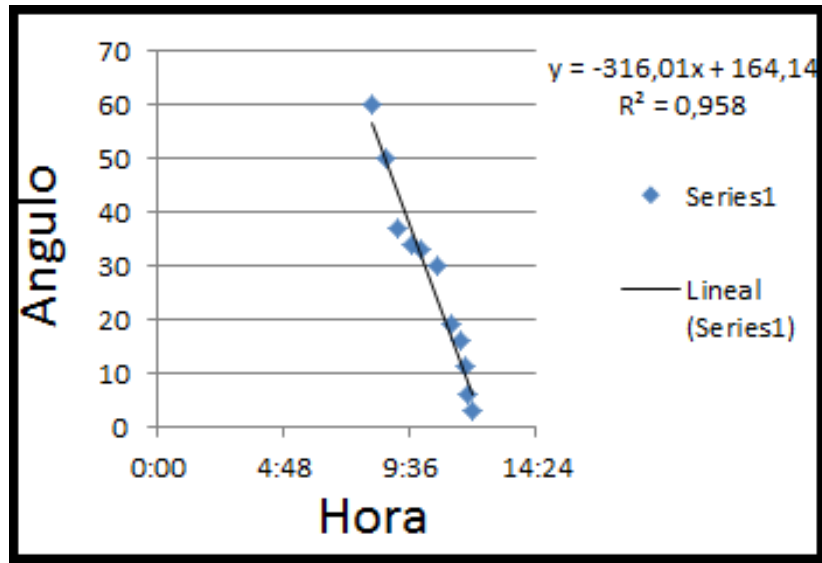


Figura. 39. Correlación lineal de los ángulos reportados en la mañana

Fuente: Autor

Otros factores de correlación no lineales se pueden obtener de la Figura. 40

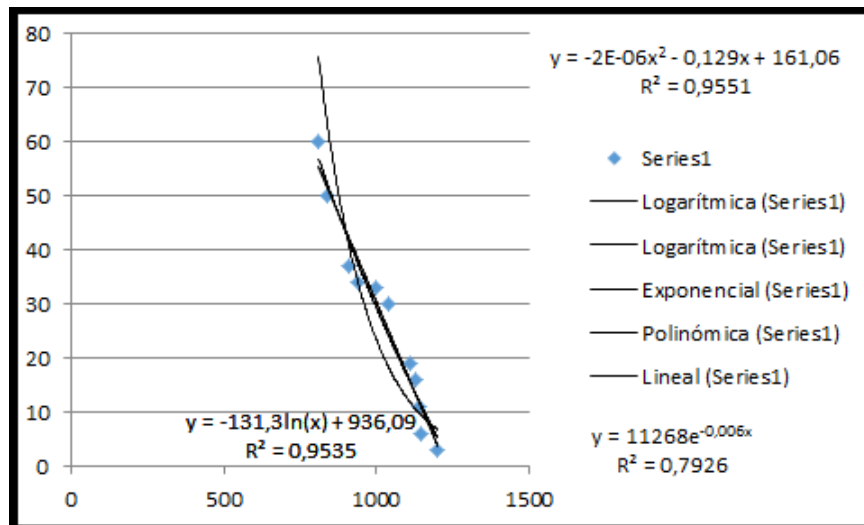


Figura. 40. Ajustes no lineales para datos obtenidos durante la mañana

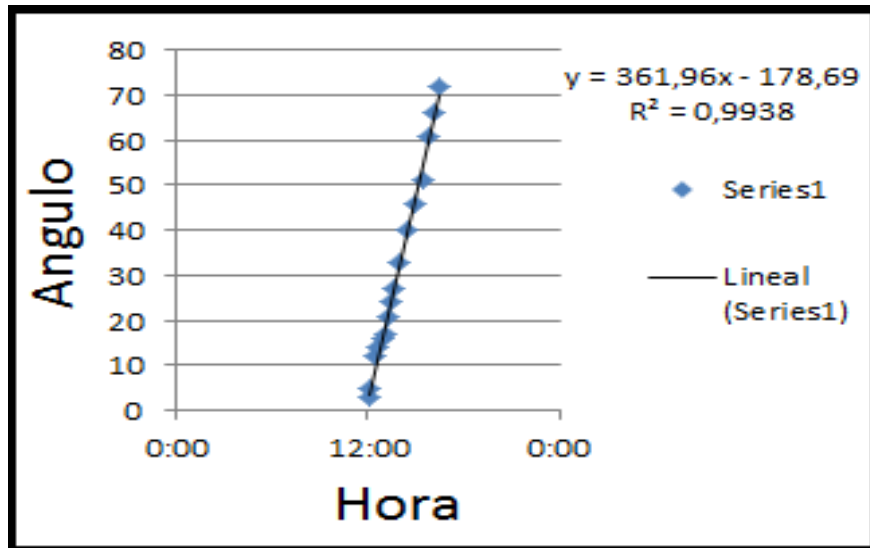
Fuente: Autor

En horas de la tarde, se realizó el mismo proceso de la mañana, obteniéndose los datos de la Tabla 12

**Tabla 12. Registro de ángulos de inclinación perpendicular a la irradiación directa de sol por la tarde**

Hora	$\theta$ °
12:05	3
12:10	5
12:25	12
12:40	14
13:00	16
13:10	17
13:15	21
13:30	24
13:40	27
13:55	33
14:30	40
15:00	46
15:25	51
15:50	61
16:10	66
16:30	72

El factor de correlación lineal en horas de la tarde es mucho más cercano a 1,  $r=0,9968$ . De acuerdo con [31] “la correlación (“r”) de las rectas determinará la calidad del ajuste. Si r es cercano o igual a 1, el ajuste será bueno y las predicciones realizadas a partir del modelo obtenido serán muy fiables (el modelo obtenido resulta verdaderamente representativo)”[31]. (Ver Figura. 41)



**Figura. 41. Correlación lineal de los ángulos reportados en la tarde**

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta estos resultados se estableció que cada 15 minutos se debe inclinar  $3,75^\circ$  al sistema de paneles desde las 6:00 am de cada día.

Con el fin de contrastar la importancia de este tipo de seguimiento solar, se realizó un estudio comparativo los días 13 y 15 de abril de 2017 bajo las dos situaciones diferentes. El día 13 se registró la potencia por medio del seguidor solar y el día 15 se usó la aplicación PV Solar Power System para ubicar la mejor posición y dirección de los paneles para ese día, como se muestra en la Figura. 42



**Figura. 42. Posicionamiento de paneles solares con aplicativo móvil PV Solar Power System**

*Fuente: Autor*

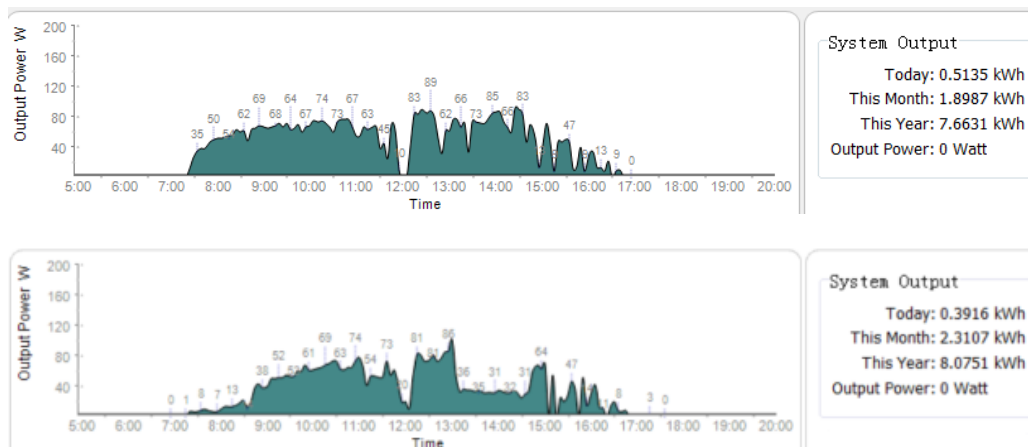
El ángulo óptimo para la latitud 7 de Floridablanca y el mes de abril encontrado por el software, por medio del sistema GPS del dispositivo móvil, fue  $8^\circ$  con dirección norte. Por medio del sistema de control se ubica el sistema en esta

posición. El registro de potencias para los dos sistemas durante las diferentes horas del día se encuentra en la Tabla 13

**Tabla 13. Valores de potencia para diferentes horas del día con y sin seguimiento solar**

HORA	P(W) sistema seguimiento	P(W) sistema estático
7:00	35	8
8:00	50	13
9:00	62	52
10:00	63	63
11:00	45	54
12:00	83	81
13:00	62	36
14:00	50	31
15:00	47	47
16:00	13	8
17:00	9	3

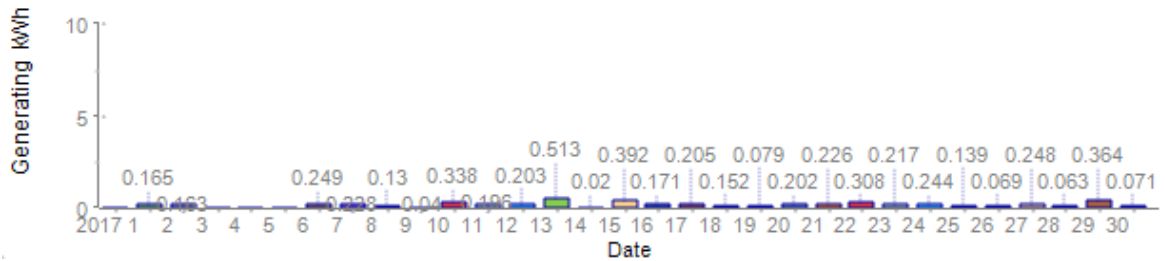
Comparando los resultados de la Tabla 13, se evidencia un aumento en el rendimiento de la instalación On Grid con sistema de seguimiento. (Ver Figura. 43)



**Figura. 43. Generación de potencia para los días 13 y 15 de abril con el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0**

Fuente: Autor

Otros datos durante el mes de abril para el sistema estático durante días soleados, fueron registrados con el software KDM como se presenta en la Figura. 44.



**Figura. 44. Registro de potencia por el software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0 durante abril**

Fuente: Autor

Se toman como datos relevantes para días soleados las potencias superiores a 300W, con lo cual se obtiene una generación promedio diaria de 350W con el sistema estático. Para establecer el aumento de potencia entre los dos sistemas se resta el consumo de 25 W del sistema de control a los 513 W generados durante el día por el sistema con seguimiento. Así obtuvimos que el aumento de rendimiento entre los dos sistemas es de aproximadamente 39 %.

# Capítulo V

## 5. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema fotovoltaico On Grid de 240 W en una estructura de seguimiento solar de dos ejes controlada con elementos y componentes electrónicos accesibles en el mercado local.

Se demostró que los sistemas de seguidores solares y sistemas On Grid mejoran el rendimiento de generación energética, de esta forma, se incide positivamente en los gastos energéticos mensuales de la institución y en la contribución con la disminución del impacto que generan los efectos del cambio climático sobre el planeta. Sin embargo, la construcción de sensores para condiciones como las de la intemperie, requiere de materiales y procesos de alto costo, con excelente respuesta a la acción del sol, lluvia, fauna y en general a todas las condiciones atmosféricas que ejercen una acción corrosiva sobre este tipo de elementos.

Profundizamos el estudio de los seguidores solares por punto luminoso y por programación de cartas solares. Usando la estructura controlada de seguimiento, corroboramos que en la práctica los seguidores programados por tiempo presentan mejor desempeño. En la posición geográfica de Colombia basta con inclinar la estructura  $3,75^\circ$  cada 15 minutos con un solo eje horizontal en dirección Este a Oeste durante 12 horas diarias desde las 6 de la mañana.

De otra parte, se demostró que en un seguidor solar a pequeña escala, sus paneles fotovoltaicos obtienen la máxima captación de energía durante todo el día, se encontró que el sistema aumenta aproximadamente desde un 39% a 51% los Wh generados en comparación con el sistema fotovoltaico estático.

El consumo de corriente del circuito de control es bajo en comparación con la potencia generada, aproximadamente el 5% de la potencia generada para días de pleno sol. Sin embargo, Floridablanca es una ciudad con alta nubosidad, lo cual hace que este porcentaje aumente hasta un 10% en días continuos.

Es necesario continuar con el desarrollo de investigación con en este tipo de tecnologías, con el propósito de cumplir con los pactos internacionales de

Colombia en 2015, en cuanto a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030. Otro aspecto es, la búsqueda de sistemas eficientes y competitivos con respecto a los sistemas convencionales de generación eléctrica que impactan negativamente el ambiente.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Figueroa, A. Pardo, and J. Díaz, *Sistema de Control Supervisorio de Acceso Remoto para Sistemas Clientes Solares Fotovoltaicos Autónomos de 500 watts*, no. 7. 2015.
- [2] ONG, “La Eficiencia Energética en el Currículum Escolar de Educación Técnico Profesional,” 2014.
- [3] C. De Colombia, “Ley N° 1715 Del 13 De Mayo De 2014,” no. May, p. 26, 2014.
- [4] C. SA, “Información General Sobre Colombia,” 2016. [Online]. Available: <http://www.colombia-sa.com/datos/datos.html>.
- [5] H. Espitia and F. Sierra, “Diseño e Implementación de Controladores Análogos para un Seguidor Solar,” pp. 118–132, 2013.
- [6] T. Maatallah, S. El Alimi, and S. Ben Nassrallah, “Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4053–4066, 2011.
- [7] F. Cruz-Peragón, P. J. Casanova-Peláez, F. a. Díaz, R. López-García, and J. M. Palomar, “An approach to Evaluate the Energy Advantage of Two Axes Solar Tracking Systems in Spain,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5131–5142, 2011.
- [8] Á. A. Bayod-Rújula, A. M. Lorente-Lafuente, and F. Cirez-Oto, “Environmental Assessment of Grid Connected Photovoltaic Plants With 2-Axis Tracking Versus Fixed Modules Systems,” *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3148–3158, 2011.
- [9] F. J. Gómez-Gil, X. Wang, and A. Barnett, “Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 306–313, 2012.
- [10] D. Guardado and V. Rivera, “Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES .,” p. 138, 2012.
- [11] M. Gonzales, A. Cohaila, and E. Paredes, “Para El Aprovechamiento De La Energía Solar En,” *Cienc. Desarro.*, p. 4, 2008.
- [12] IPSE, “Construcción y Puesta en Operación de 125 kW de Energía Solar,” 2009.

- [13] IPSE, “Suministro, Montaje, Pruebas y Puesta en Operación de Cinco Sistemas de Seguidores Solares en Diferentes Localidades de las Zonas no Interconectadas del País.,” 2008. [Online]. Available: file:///C:/Users/duarte\_aleman\_portab/Downloads/C\_PROCESO\_08-11-129155\_121010000\_880434[1] (2).pdf.
- [14] INNCOM, “Energía Solar Fotovoltaica,” 2016.
- [15] J. Wright, “Cálculo Espectral De La Irradiación Solar Directa,” *UNICIENCIA*, pp. 71–86, 2008.
- [16] EcuRed, “Conocimiento con Todos y Para Todos,” *Luz Solar*, 2017. [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/Luz\\_solar](https://www.ecured.cu/Luz_solar).
- [17] J. Enseñat *et al.*, *Energía solar Térmica y Fotovoltaica en el marco del Código Técnico de la Edificación*. 2007.
- [18] M. R. Solar, “Semi-flex Mono Solar Panel.” [Online]. Available: [https://es.aliexpress.com/store/product/3-58W-5-21-24-Mono-solar-cell-Sunpower-Maxeon-Solar-Cell-light-weight-bend-30/400691\\_32331478862.html?spm=2114.12010608.0.0.SKdkIL](https://es.aliexpress.com/store/product/3-58W-5-21-24-Mono-solar-cell-Sunpower-Maxeon-Solar-Cell-light-weight-bend-30/400691_32331478862.html?spm=2114.12010608.0.0.SKdkIL).
- [19] A. Espinosa and R. Cabrera, “Desarrollo de un Plan de Negocios para la Instalación de Plantas fotovoltaicas,” Universidad de Chile, 2016.
- [20] M. Torres *et al.*, *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. 2008.
- [21] SunColombia, “El Sol Sale Para Todos,” 2017. [Online]. Available: <http://www.suncolombia.com/producto/microinversor-wvc-600w/>.
- [22] E. Turrillas and J. Aginaga, “Estudio Comparativo de la Eficiencia Energética en Seguidores Solares,” 2014.
- [23] STi\_Norland, “Products: Solar Trackers and Fixed Structures,” 2017. [Online]. Available: <http://www.stinorland.com/productos/>.
- [24] C. Vides and I. Torres, “Controlador de Máxima Eficiencia Solar Basado en el Máximo Punto de Potencia en un Sistema Fotovoltaico Autónomo,” 2014.
- [25] Infineon, “BTS 7960B,” 2005. [Online]. Available: <http://www.infineon.com/dgdl/bts7960b-pb-final.pdf?folderId=db3a3043156fd5730116144c5d101c30&fileId=db3a30431ed1d7b2011efe782ebd6b60>.
- [26] IndustriasJQ, “Plásticos de Ingeniería,” 2016. [Online]. Available: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Polycarbonato/dtecnicos/propiedades.htm>.

- [27] CastroComposites, “Tipos de Resinas Epoxi,” 2017. [Online]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/es/22-resinas-epoxi>.
- [28] CENTELSA, “Conductores electricos de uso obligatorio segun el retie,” 2004.
- [29] Ministerio de Minas y Energía, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE),” *Bogotá, Colomb.*, p. 210, 2013.
- [30] Unidad de Planeación Minero Energética, “Eficiencia Energética en Motores Eléctricos,” pp. 1–33, 2007.
- [31] R. Guillen, *Regresión Lineal*. 2016.
- [32] PTPL, “KDM Solar Energy Monitoring System,” 2014. .

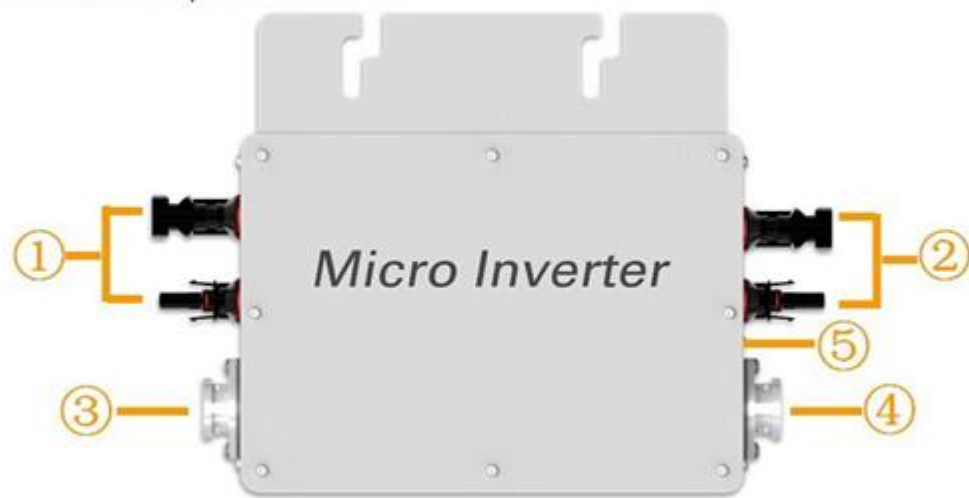
## ANEXO I. MANUAL DE INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE KDM SOLAR ENERGY MONITORING SYSTEM 3.0



**Figura. 45. Software KDM Solar Energy Monitoring System 3.0**

Fuente: Autor

KDM Solar Energy Monitoring System 3.0 es un software de monitoreo de potencia diseñado especialmente para sistemas de generación de potencia del fabricante chino PTPL, y necesita trabajar con un micro inversor solar (ver Figura. 46) y modem de PTPL, no es compatible con productos de otras marcas.



**Figura. 46. Micro inversor PTPL[13]**

- 1- Panel fotovoltaico de entrada 1
- 2- Panel fotovoltaico de entrada 2
- 3- Entrada de AC
- 4- AC onput-conectar al siguiente
- 5- indicador LED

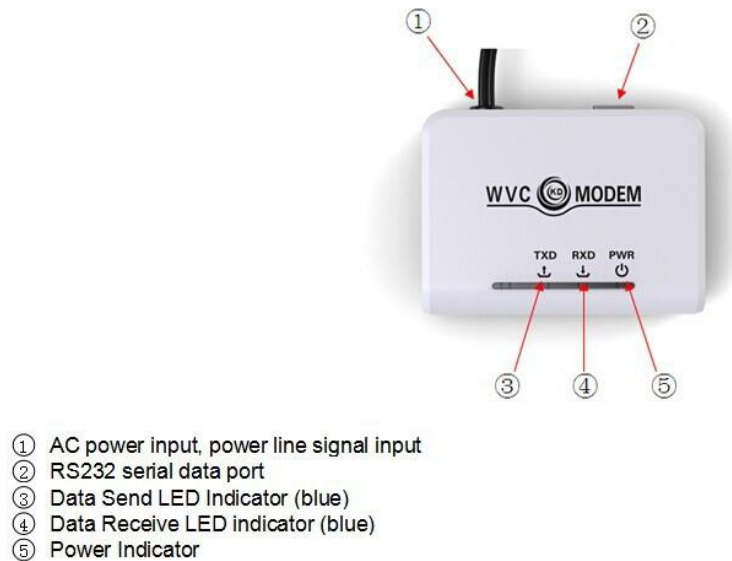
¿Por qué el uso de micro-inversores?

- La transición de un inversor central a una distribuida optimiza energía captada.
- El módulo inversor integrado en los paneles solares puede reducir los costos de instalación.
- Mediante la reducción de la temperatura del inversor, usted puede mejorar la fiabilidad del sistema de 5 años a 20 años.
- El inversor se puede conectar a la red para eliminar la necesidad de la batería. El alto precio de las baterías, requieren mantenimiento y la esperanza de vida es más corto.
- La energía requerida por el micro-inversor es pequeña, que puede reducir la temperatura interna y mejorar la fiabilidad.

KDM 3.0 Sistema de Supervisión de Potencia trabaja por medio de tecnología de comunicación sobre la línea de conducción eléctrica para realizar la comunicación de datos. Las funciones principales son la supervisión de condiciones de trabajo

del equipo, la capacidad diaria, semanal, y mensual del equipo para registrar las curvas de análisis. Para manejar este software de supervisión, se debe primero instalar el sistema de generación solar de PTPL, los micro inversores de PTPL y el módem (ver Figura. 47) y filtro WVC (ver Figura. 48 ).

#### Data collection



**Figura. 47. Puertos de conexión WVC Modem[13]**

En la Figura. 47 y Figura. 48 se presentan los diagramas de conexión de los equipos para monitoreo con el sistema de PTPL.

Power line signal filter



- ① N-pole AC output
- ② N-pole AC input
- ③ L-pole AC input
- ④ Output Ground
- ⑤ L-pole AC output
- ⑥ Fixed
- ⑦ Input Ground

**Figura. 48. Puertos de conexión WVC System Power Line Filter[13]**



**Figura. 49. Instalación del sistema PTPL[13]**

## Condiciones de funcionamiento del dispositivo de monitoreo (según fabricante [32])

A través de KDM 3.0, los usuarios pueden monitorear las condiciones de trabajo de cada uno de los Micro inversores. Para proporcionar una respuesta rápida en caso de que acontezca alguna falla en el sistema.

### Dispositivo de control

El usuario puede directamente controlar cada micro inversor a través de KDM (ver Figura. 50), tales como un cierre temporal, arranque temporal, cierre total y arranque total, ajuste de la potencia, modificación de los parámetros de potencia, reinicio del modem WVC, etc.



**Figura. 50. Monitoreo del conjunto de Micro inversores[13].**



## **Capacidad de monitoreo de datos de generación de potencia**

El KDM 3.0 toma muestras en tiempo real de la corriente, voltaje y temperatura y calcula en tiempo real la potencia generada del sistema de inversores.

## **Potencia generada diaria, semanal y mensual con curvas de análisis**

KDM 3.0 puede graficar las curvas de uno o varios de los micro inversores usados, de tal forma que el usuario pueda analizar fácilmente el estado de generación de potencia en tiempo real.

## **Desempeño**

KDM 3.0 presenta las siguientes limitaciones:

- Cada modem puede monitorear un máximo de 100 microinversores
- Cada computador puede conectar un máximo de 255 modem WVC
- Cada 0.5 segundos el sistema actualiza los datos de cada uno de los microinversores
- Cada minuto el sistema almacena y guarda los datos actualizados del modem WVC
- Cada 5 minutos el sistema guarda todos los datos de generación de potencia una vez

## **Entorno de hardware**

El KDM 3.0 trabaja con todo tipo de computador convencional, con los siguientes requerimientos básicos.

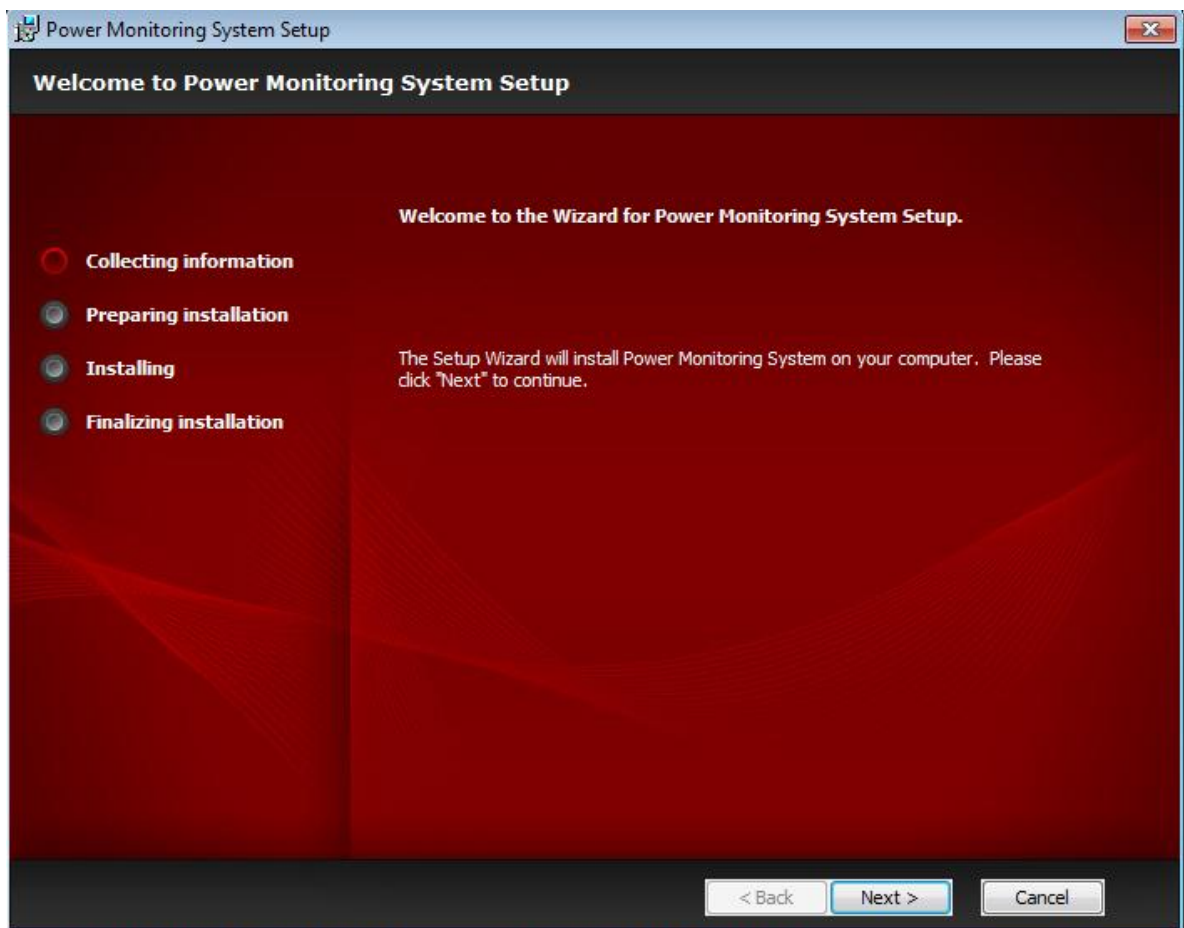
- CPU: 2.0Ghz o superior
- RAM: 1G o superior
- Hard disk: 80G o superior
- Display card: 128M o superior
- Operation system: Windows XP P2 o superior

## Soporte de software

KDM es un conjunto de herramientas de software, que puede trabajar normalmente en Windows XP o superior. No necesita instalarse ningún otro software de apoyo. El sistema de base de datos para el almacenamiento de datos está incorporado y no necesita instalación.

## Instalación

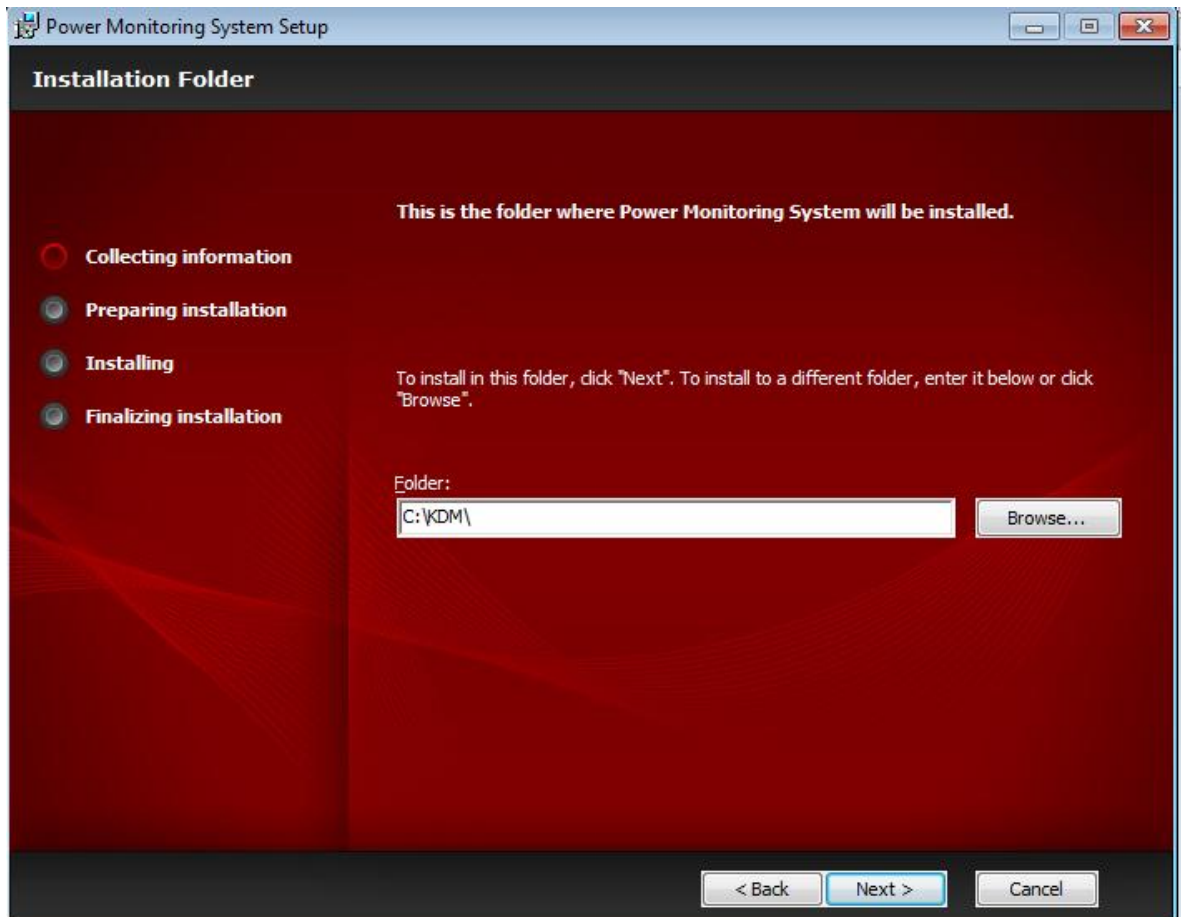
Ejecutar el archivo KDM.exe incluido en el CD que se incluye con el modem WVC.



**Figura. 51. Paso 1 de instalación KDM 3.0**

Fuente: Autor

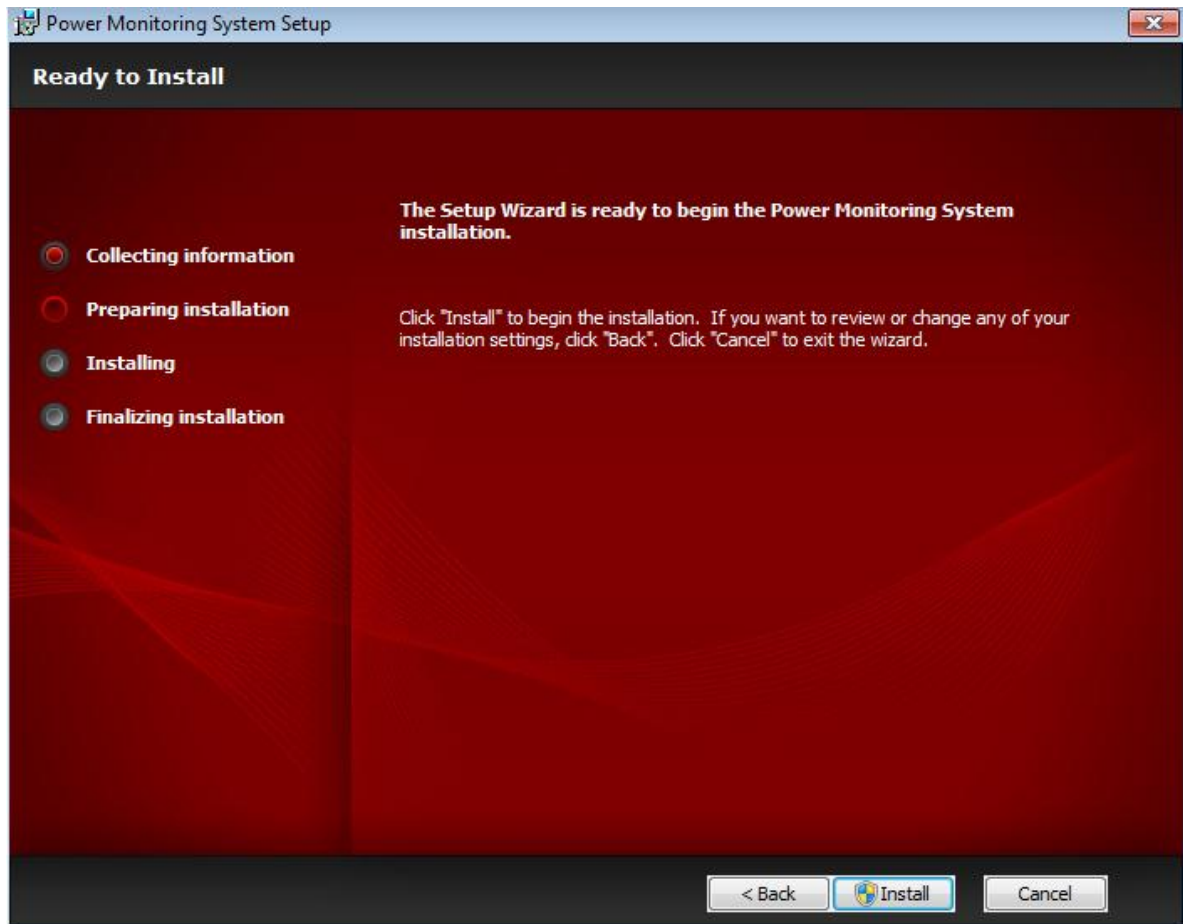
Dar clic en siguiente y seleccionar la ubicación de instalación del software.



**Figura. 52. Paso 2 de instalación de KDM 3.0**

Fuente: Autor

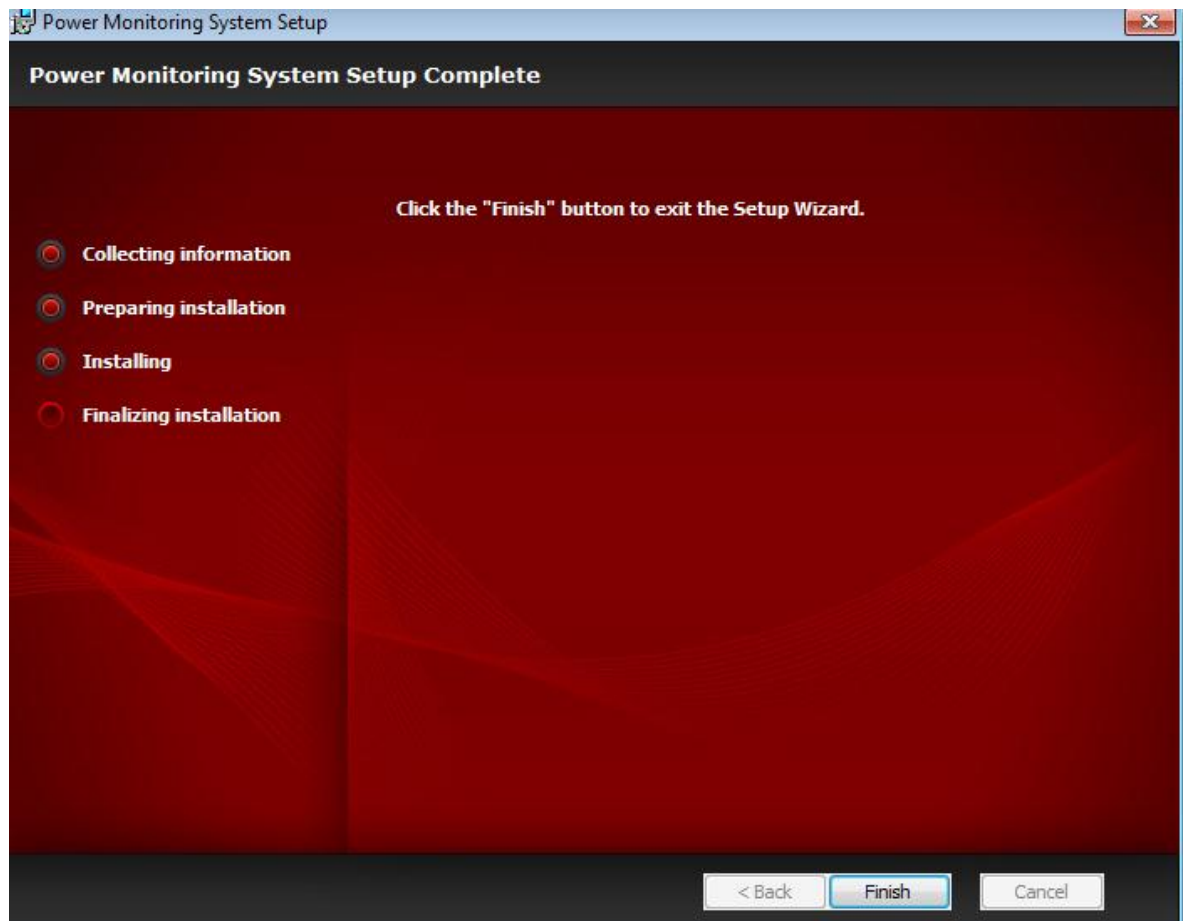
Dar clic en siguiente e instalar para finalizar la instalación del software.



**Figura. 53. Paso 3 de instalación de KDM 3.0**

Fuente: Autor

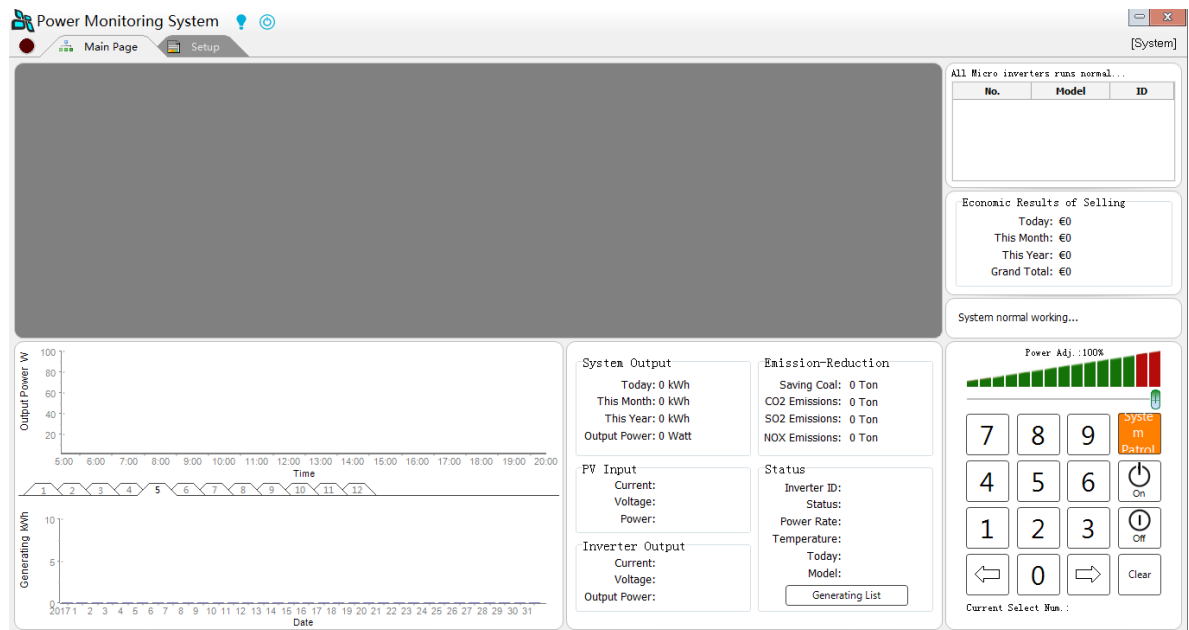
Dar clic en finalizar y el software estará correctamente instalado.



***Figura. 54. Paso 4 de instalación de KDM 3.0***

Fuente: Autor

En la Figura. 55 se presenta la pantalla inicial del software sin configurar.



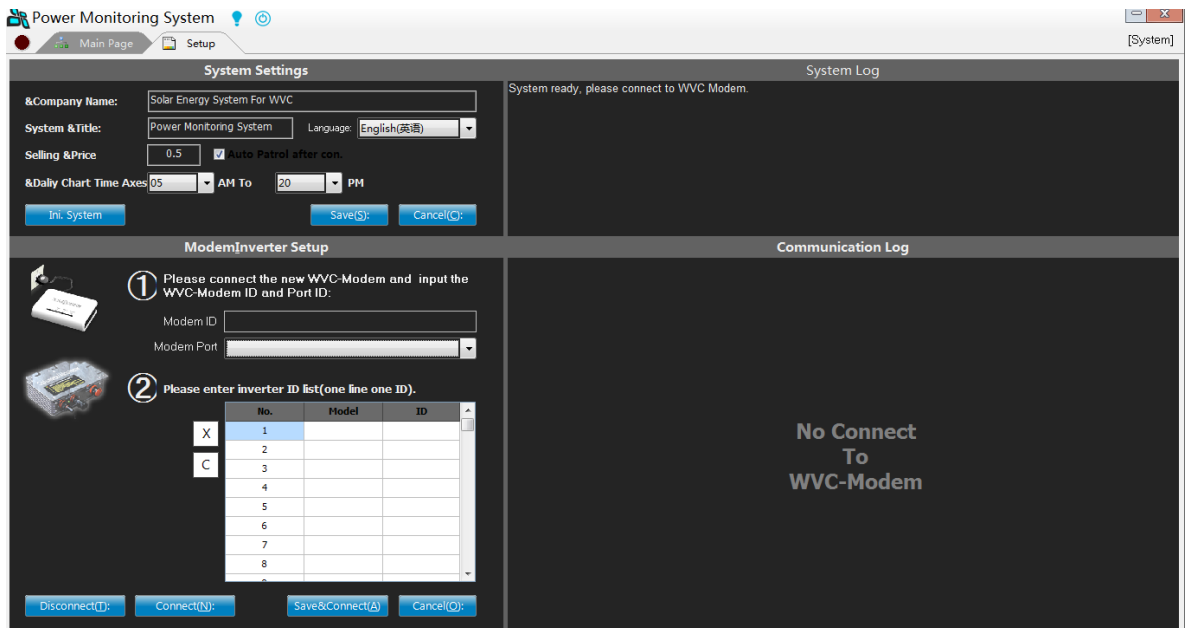
**Figura. 55. Pantalla inicial de KDM 3.0 sin configurar**

Fuente: Autor

## Configuración

Los WVC Modem contienen un número de identificación que debe ser escrito en la casilla del sector 1 de la Figura. 56 y se selecciona el puerto de conexión con el PC. En el sector 2, se debe registrar el modelo de Micro inversor que se está usando, así como el número de identificación que posee cada uno de los Micro inversores WVC.

De esta forma el sistema estará listo para monitorear las condiciones de generación del sistema.



**Figura. 56. Pantalla de configuración de equipos WVC**

Fuente: Autor